GABRIEL TORRES

ELETRÔNICA

Para Autodidatas, Estudantes e Técnicos

2ª Edição

Clube do Hardware

GABRIEL TORRES

ELETRÔNICA

Para Autodidatas, Estudantes e Técnicos

2ª Edição

Clube do Hardware

Copyright © 2018 Gabriel Torres
Copyright © 2018 Clube do Hardware

Projeto gráfico ..... Clube do Hardware

ELETRÔNICA

Para Autodidatas, Estudantes e Técnicos - 2ª Edição

Versão 15/05/2018

Gabriel Torres

ISBN 978-85-52971-01-6

Nenhuma parte deste livro poderá ser reproduzida sem a autorização prévia e por escrito do autor Gabriel Torres.

Apesar de toda a atenção, erros de digitação não são descartados. Caso encontre algum erro neste livro, por favor, entre em contato conosco pelo e-mail webmaster@clubedohardware.com.br para que possamos verificar e eventualmente corrigir o livro.

O Autor, Gabriel Torres, exclue-se de quaisquer responsabilidades por eventuais perdas ou danos a pessoas ou bens por uso deste livro.

Não fornecemos suporte técnico ou garantia técnica de qualquer tipo, nem tampouco a leitura desta obra dá direito a qualquer tipo de certificação. Ao adquirir o seu exemplar deste livro você concorda com estes termos. Dúvidas sobre qualquer assunto abordado neste livro devem ser dirimidas em https://www.clubedohardware.com.br/forums, onde serão respondidas por membros de nossa comunidade.

Clube do Hardware

Rio de Janeiro • RJ
www.clubedohardware.com.br

Seja aluno de Gabriel Torres e aprenda sobre redes diretamente com o autor deste livro!

CURSO ARQUITETURA DE REDES

Neste curso você aprenderá o embasamento teórico necessário para aprofundar seus estudos em cursos intermediários e avançados. Você aprenderá, entre outros assuntos, sobre princípios de funcionamento de redes, números binários, arquiteturas, comunicação, protocolos, equipamentos de redes, segurança e muito mais!

"Simplesmente incrível a quantidade de informação que o curso contém e a maneira do professor explicar. Estou gostando demais do curso e vejo que realmente valeu a pena investir nele." - *Cassius Thalles Costa Mendes*

CURSO REDES TCP/IP

Você aprenderá, entre outros assuntos, sobre endereçamento IPv4 e IPv6, portas, tradução de endereços (NAT), protocolos de aplicação (HTTP, DNS, FTP, email, etc.), protocolos de transporte (TCP e UDP), protocolos de rede (IPv4, IPv6, IPsec e ICMP), protocolos de roteamento e muito mais!

"Estou muito satisfeito com o curso! Muito bom e didático!" *Adilson Enio Pierog*

Vantagens dos nossos cursos:

- Pagamento único, sem mensalidades
- Acesso vitalício
- Atualizações regulares com novas aulas e melhorias
- Acesso grátis a futuras aulas e atualizações
- Seção de perguntas e respostas para você tirar as suas dúvidas sobre o conteúdo do curso
- Certificado de conclusão de curso

https://www.clubedohardware.com.br/cursos/

Agradecimentos

Gostaria de agradecer principalmente a todos os leitores pela paciência na espera deste tão aguardado livro.

Ao Prof. Rafael Coelho, que me ajudou na revisão técnica fazendo com que esse livro ficasse o mais completo possível e sem erros técnicos.

Sobre o Autor

Gabriel Torres é formado técnico em eletrônica pelo Instituto de Tecnologia ORT e é um dos mais conhecidos especialistas brasileiros em hardware e redes de computadores, além de autor best-seller na área, tendo outros 23 livros publicados.

É fundador e editor executivo de uma das maiores, mais antigas e mais respeitadas publicações sobre informática, redes e tecnologia do Brasil, o Clube do Hardware (https://www.clubedohardware.com.br), que recebe a visita mensal de mais de cinco milhões de usuários.

Foi colunista do caderno de informática do jornal O DIA (RJ) durante quase 11 anos (1996-2007). Em 2001 e novamente em 2003 a Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro (ALERJ) homenageou as empresas que mais ajudaram o desenvolvimento da informática no Estado do Rio de Janeiro. No segmento de mídia, o jornal O DIA foi o homenageado, com moção especial a Gabriel Torres "pelos inestimáveis serviços prestados à informática brasileira".

Sobre a Pirataria

Aqueles que acompanham o meu trabalho sabem que, devido ao altíssimo índice de pirataria no Brasil, eu relutei por mais de vinte anos em publicar meus livros no formato ebook. A transição para este formato, no entanto, foi inevitável, devido às mudanças mercadológicas que vimos nos últimos anos.

A maioria dos brasileiros acha que conseguir um livro, uma música ou um filme pirata não tem "nada de mais" e não está dando prejuízo a ninguém. Isto, porém, está longe de ser verdade. Ao adquirir uma cópia pirata dos meus livros, você está fazendo com que eu fique desestimulado a atualizá-los e a lançar novos títulos. Como você se sentiria se trabalhasse duro durante o mês inteiro em seu emprego, fazendo horas extras durante a semana e trabalhando aos finais de semana, e no final do mês o seu patrão disser que não vai te pagar e que não há nada que você possa fazer? Frustante, não é mesmo? Pois é exatamente assim como eu me sinto quando vejo pessoas usando cópias piratas dos meus livros.

Por isso, peço que não "empreste" nem "passe adiante" este arquivo, caso queira que eu continue escrevendo livros no futuro.

Apresentação

Eletrônica não é um bicho de sete cabeças. Pelo contrário, é um assunto extremamente fascinante. Mas porque tanta gente acha o assunto complicado? O grande problema não é o assunto, mas os demais livros existentes no mercado sobre o tema. Salvo raras exceções, os livros sobre eletrônica existentes em nosso mercado são complicados demais, escritos em uma linguagem extremamente técnica de difícil compreensão e, em grande parte, utilizando uma aplicação matemática pesadíssima, fazendo com que o leitor tenha que ser engenheiro para poder entender o que está escrito. Com isso, a maioria dos livros de eletrônica fica muito distante do público geral.

Nossa proposta com este livro é justamente preencher essa lacuna: um livro de leitura fácil, leve e agradável, sem o uso de termos complicados nem tampouco demonstrações matemáticas mirabolantes, mas sem significar superficialidade. Outra vantagem da presente obra é o cunho prático da mesma, simplesmente inexistente em outros livros didáticos (por exemplo, ensinamos como é feita a leitura de componentes SMD).

Com essa proposta, criamos um livro que pode ser lido por qualquer pessoa que tenha interesse em aprender eletrônica ou refrescar seus conhecimentos. Tanto o leigo, o curioso e o hobista, passando pelos estudantes da área – tanto em nível técnico quanto em nível superior – e, ainda, os profissionais da área, tais como técnicos e engenheiros, todos, sem exceção, tirarão enorme proveito com a leitura deste livro.

Este livro apresenta também grande parte do currículo obrigatório adotado pelas escolas técnicas e faculdades na formação de profissionais na área de elétrica e eletrônica, tornando o presente trabalho perfeito para a adoção formal ou informal na grade curricular de cursos profissionalizantes, ou para o complemento de estudos dos cursos que preferirem adotar livros mais aprofundados sobre o tema.

SUMÁRIO

Parte I – Introdução 1

Capítulo 1 – Unidades de Medida 3
Introdução 3
Grandezas Físicas 3
Múltiplos e Submúltiplos 4
Arredondamentos 6
Exercícios 7

Capítulo 2 – Simbologia 9
Introdução 9
Conexões 13
Símbolos 14
Fontes de Alimentação 15
Chaves e Interruptores 16
Resistores 17
Capacitores 18
Indutores 18
Transformadores 19
Diodos 20
Tiristores 20
Transistores 21
Instrumentos de Medida 22
Outros 22
Exercícios 23

Parte 2 – Eletricidade Básica 25

Capítulo 3 – O que é a Eletricidade? 27
Introdução 27
Carga Elétrica 28
Eletrização 29
Exercícios 30

Capítulo 4 – Tensão Elétrica Contínua 31
Introdução 31
Pilhas vs. Baterias 31
Funcionamento de Pilhas e Baterias 33
Simbologia 36
Diferença de Potencial 37
Várias Fontes de Tensão Contínua em um Mesmo Circuito 38
Ligação de Fontes de Tensão Contínua em Série 39
Ligação de Fontes de Tensão Contínua em Paralelo 39
Lei das Malhas 40
Lei de Ohm 43
Tensão Contínua vs. Corrente Contínua 43
Exercícios 44

Capítulo 5 – Tensão Elétrica Alternada 45
Introdução 45
Tensão de Pico 46
Tensão de Pico-a-Pico 47
Tensão Eficaz (RMS) 47
Tensão Média 49
Frequência 50
Formas de Onda 51
Forma de Onda Quadrada 51
Forma de Onda Retangular 52
Forma de Onda Triangular 53
Forma de Onda “Dente de Serra” 54
Defasagem 55
Ligação de Várias Fontes de Tensão Alternada em um Mesmo Circuito 56
O Choque 58
Aterramento 58
Por Que a Rede Elétrica Usa Tensão Alternada? 59
Tensão Alternada vs. Corrente Alternada 60
Simbologia 61
Lei de Ohm 61
Exercícios 62

Capítulo 6 – Corrente Elétrica 63
Introdução 63
Representação: Sentido Eletrônico e Sentido Convencional 63
Circuito Aberto e Circuito Fechado 64
Curto-Circuito 65
Funcionamento da Corrente Elétrica 66
Lei dos Nós 66
Lei de Ohm 69
Exercícios 69

Capítulo 7 – Resistência Elétrica 71
Introdução 71
Simbologia 71
Condutores e Isolantes 72
Lei de Ohm 72
Ligação de Resistores em Série 74
Ligação de Resistores em Paralelo 74
Ligação de Resistores em Série e em Paralelo ao Mesmo Tempo 76
Exercícios 77

Capítulo 8 – Impedância 79
Introdução 79
Reatância Indutiva 80
Reatância Capacitiva 80
Reatâncias Diferentes em um Mesmo Circuito 81
Circuito LC em Série 82
Circuito LC em Paralelo 84
Cálculo de Impedância 85
Cálculo de Impedância com Componentes em Série 86
Cálculo de Impedância com Componentes em Paralelo 88
Ressonância 89
Exercícios 91

Capítulo 9 – Potência Elétrica 93
Introdução 93
Máxima Transferência de Potência 94
Unidades de Potência 97
Decibel 99
Pressão Sonora 100
Exercícios 101

Capítulo 10 – Eletromagnetismo 103
Introdução 103
Alto-Falantes 106
Relés 108
Exercícios 109

Parte 3 – Introdução à Análise de Circuitos Elétricos 111

Capítulo 11 – Divisor de Tensão 113
Introdução 113
Fórmula do Divisor de Tensão 113

Capítulo 12 – Divisor de Corrente 115
Introdução 115
Fórmula do Divisor de Corrente 115
Exercícios 117

Capítulo 13 – Circuitos Delta e Estrela 119
Introdução 119
Conversão de Circuito Delta em Estrela 120
Exercícios 122

Capítulo 14 – Teorema de Thévenin 123
Introdução 123
Calculando V_{TH} 124
Calculando R_{TH} 125

Calculando a Corrente em R_X 125
Convertendo Thévenin em Norton 126
Exercícios 126

Capítulo 15 – Teorema de Norton 127
Introdução 127
Calculando I_N 128
Calculando a Corrente em R_X 129
Convertendo Norton em Thévenin 130
Exercícios 130

Parte 4 – Medidas Elétricas 133

Capítulo 16 – Galvanômetro 135
Introdução 135
Funcionamento 136
Simbologia 136

Capítulo 17 – Ponte de Wheatstone 139
Introdução 139
Funcionamento 139

Capítulo 18 – Amperímetro 143
Introdução 143
Como Construir um Amperímetro 143
Usando um Amperímetro 146
Amperímetros Indutivos 147
Exercícios 148

Capítulo 19 – Voltímetro 149
Introdução 149
Como Construir um Voltímetro 149
Voltímetro CA 151

Usando um Voltímetro 153
Sensibilidade 154
Exercícios 155

Capítulo 20 – Ohmímetro 157
Introdução 157
Como Construir um Ohmímetro 157
Usando um Ohmímetro 162
Exercícios 164

Capítulo 21 – Multímetro 165
Introdução 165
Multímetros Analógicos vs. Digitais 167
Como Usar um Multímetro 168
Teste de Continuidade 169
Medida de Resistência 170
Medida de Tensão 171
Medida de Corrente 173
Outras Medidas 174
Exercícios 175

Capítulo 22 – Osciloscópio 177
Introdução 177
Usando um Osciloscópio 178
Instalação 181
Exercícios 182

Parte 5 – Componentes Eletrônicos 185

Capítulo 23 – Resistores 187
Introdução 187
Simbologia 187
Resistores Convencionais 187
Potência 188

Código de Cores 190
Valores Comerciais 192
Ligação 194
Terminações Resistivas 194
Resistores SMD 195
Potenciômetros 197
Resistor Dependente de Luz (LDR, Light Dependent Resistor) 199
Termistores 200
Varistores 201
Aplicação 201
Aspecto Físico 202
Exercícios 203

Capítulo 24 – Capacitores 205
Introdução 205
Simbologia 207
Aplicações 208
Filtros 209
Circuito de Sintonia 211
Osciladores 212
Ligação 212
Capacitores Cerâmicos 215
Capacitores de Poliéster 219
Capacitores Eletrolíticos 220
Capacitores Sólidos 222
Capacitores de Tântalo 222
Capacitores SMD 225
Capacitores Variáveis 227
Testando Capacitores 227
Exercícios 228

Capítulo 25 – Bobinas 229
Introdução 229
Simbologia 230

Funcionamento 231
Aplicações 234
Lendo Valores 235
Bobinas SMD 235
Código de Cores 236
Como Testar 237
Exercícios 237

Capítulo 26 – Transformadores 239
Introdução 239
Simbologia 240
Bobina Que Se Parece Com um Transformador 241
Construção 241
Relação de Espiras 242
Direção dos Enrolamentos 243
Material do Núcleo 244
Aplicações 245
Casamento de Impedância 247
Testando Transformadores 248
Exercícios 248

Capítulo 27 – Diodos 251
Introdução 251
Simbologia 252
Funcionamento de Dispositivos Semicondutores 253
Diodo de Junção 257
Características 258
Nomenclatura 261
Diodos SMD 262
Aplicações 263
Circuitos Retificadores 263
Forçando uma Queda de Tensão 264
Proteção Contra Descarga de Bobinas 264
Testando Diodos de Junção 265

Usando um Multímetro Analógico....265
Usando um Multímetro Digital....266
Diodo Emissor de Luz (LED, Light Emitting Diode)....267
Displays de Sete Segmentos....269
Testando LEDs....270
Diodo Zener....270
Características....270
Aplicação....271
Valores Comerciais....273
Lendo Diodos Zener....273
Testando Diodos Zener....274
Diodo Schottky....274
Nomenclatura....275
Testando Diodos Schottky....276
Diodo Tunnel....276
Diodo PNPN (Pinpin)....277
DIAC....278
Diodo Varicap....278
Exercícios....278

Capítulo 28 – Tiristores....279
Introdução....279
SCR (Silicon Controlled Rectifier)....280
Características....281
Funcionamento....282
Aplicação....282
TRIAC....283
Aplicação....284
Exercícios....286

Capítulo 29 – Transistores....287
Introdução....287
Encapsulamento....288
Simbologia....290

Nomenclatura 291
Transistores Bipolares (BJT) 292
Estrutura 293
Configurações 293
Características 295
Aplicações 296
Transistor Como Amplificador 297
Seleção do Transistor 299
Corte e Saturação 301
Método Prático para Projeto de Amplificadores 305
PNP vs. NPN 306
Classes de Amplificadores 306
Transistor Como Chave 308
Transistor Como Regulador de Tensão 310
Testando Transistores Bipolares 311
Testando Transistores Usando Multímetro Analógico 311
Testando Transistores Usando Multímetro Digital 312
Testando Transistores Com Pinagem Desconhecida 312
Transistor Darlington 313
Transistor de Efeito de Campo (FET) 314
Aplicações 315
MOSFET 316
Características 317
Testando Transistores FET e MOSFET 317
Fototransistor 317
Transistor Unijunção (UJT) 318
Parâmetros 320
Aplicação 321
Exercícios 322

Capítulo 30 – Circuitos Integrados 325
Introdução 325
Construção 326
Encapsulamento 327

Nomenclatura 330
Simbologia 331
Testando Circuitos Integrados 331
Amplificadores Operacionais 332
Alimentação 334
Configurações 335
Amplificador Não Inversor 335
Amplificador Inversor 336
Seguidor de Sinal 337
Amplificador Diferencial 338
Somador 339
Outras Configurações 340
O Circuito Integrado 741 340
Temporizadores 341
O Circuito Integrado 555 342
Multivibrador Astável com o 555 342
Multivibrador Monoestável com o 555 344
Reguladores de Tensão 345
Optoisoladores 346
Contador de Década 347
Exercícios 351

Parte 6 – Circuitos Clássicos 353

Capítulo 31 – Fontes de Alimentação 355
Introdução 355
Fontes de Alimentação Lineares 356
Abaixando a Tensão Alternada 358
Retificação 359
Filtragem 359
Regulação de Tensão 360
Fontes de Alimentação Chaveadas 361
Filtragem de Transientes 363
PFC Passivo 364

Retificação, Dobrador de Tensão e Filtragem....364
PFC Ativo....365
Chaveamento....366
Retificação (Secundário)....370
Filtragem (Secundário)....372
Realimentação....373
Proteções....373
Exercícios....374

Capítulo 32 – Multiplicadores de Tensão....377
Introdução....377
Dobrador de Tensão de Meia-Onda....377
Dobrador de Tensão de Onda Completa....378
Triplicador de Tensão,
Quadruplicador de Tensão e Outros....380
Exercícios....381

Capítulo 33 – Filtros....383
Introdução....383
Tipos....383
Filtros Passa-Alta....384
Filtros Passa-Alta Passivos....385
Filtros Passa-Alta Ativos....387
Filtros Passa-Baixa....388
Filtros Passa-Baixa Passivos....388
Filtros Passa-Baixa Ativos....390
Filtros Passa-Faixa....391
Filtros Passa-Faixa Passivos....391
Filtros Passa-Faixa Ativos....392
Filtros Rejeita-Faixa....394
Filtros Rejeita-Faixa Passivos....394
Filtros Rejeita-Faixa Ativos....396
Exercícios....398

Capítulo 34 – Geradores de Formas de Onda 399
Introdução 399
Gerador de Onda Quadrada ou Retangular 399
Gerador de Onda Triangular 402
Gerador de Onda Senoidal 403
Gerador de Funções 404
Exercícios 406

Apêndice – Desenvolvimento dos exercícios propostos 407

Bibliografia 479

Parte I
Introdução

Antes de nos aprofundarmos no estudo da eletrônica, explicaremos sobre as unidades de medida usadas, arredondamentos, diagramas em blocos, diagramas esquemáticos e a simbologia de componentes.

Capítulo 1
Unidades de Medida

Introdução

Antes de estudarmos as principais grandezas elétricas na Parte 2 do livro, gostaríamos de apresentar um resumo incluindo as principais grandezas físicas usadas no âmbito da eletricidade e eletrônica, incluindo os seus símbolos e formas comuns de representar valores muito baixos ou muito altos.

Grandezas Físicas

Na Tabela 1.1 nós resumimos as principais grandezas físicas usadas no âmbito da eletricidade e eletrônica, conforme definidas pelo Sistema Internacional de Unidades (SI).

Tabela 1.1: Grandezas físicas.

Grandeza	Símbolo da Grandeza	Unidade	Símbolo da Unidade
Campo Magnético	B	tesla	T
Capacitância	C	farad	F
Carga Elétrica	q	coulomb	C
Condutância	G	siemens (ou mho)	S
Condutividade	σ	siemens por metro	S/m
Corrente	I	ampère	A

(continua)

Grandeza	Símbolo da Grandeza	Unidade	Símbolo da Unidade
Diferença de Potencial	V ou E	volt	V
Fluxo Magnético	φ	weber	Wb
Frequência	f	hertz	Hz
Impedância	Z	ohm	Ω
Indutância	L	henry	H
Permeabilidade	μ	henry por metro	H/m
Potência	P	watt	W
Reatância	X	ohm	Ω
Resistência	R	ohm	Ω
Resistividade	ρ	ohm metro	Ω·m

Em alguns lugares você verá ohm sendo abreviado como "R" em vez do uso da letra grega ômega (Ω). Isso vem do fato de que antigamente livros e revistas eram escritos usando máquinas de escrever, não possuindo letras gregas. Algumas pessoas continuam usando esta abreviatura até hoje em dia, devendo ser evitada, já que computadores atualmente conseguem imprimir "Ω" sem problemas.

Múltiplos e Submúltiplos

Muitas vezes nós teremos de lidar com valores muito baixos ou muito altos. Por exemplo, uma corrente de 0,001 A, uma resistência de 1.000.000 Ω ou uma capacitância de 0,000 000 001 F. Assim, em vez de representarmos valores nessa forma, podemos usar as abreviações apresentadas na Tabela 1.2, que "escondem" os zeros, facilitando o trabalho de representar valores muito pequenos ou muito grandes. É mais fácil dizer "uma corrente de 1 mA" do que "uma corrente de 0,001 A", "um resistor de 1 MΩ" do que "um resistor de 1.000.000 Ω", e "um capacitor de 1 nF" do que "um capacitor de 0,000 000 001 F".

Tabela 1.2: Múltiplos e submúltiplos.

Unidade	Símbolo	Valor (Potência de 10)	Valor (Decimal)
Tera	T	10^{12}	1.000.000.000.000

(continua)

Unidade	Símbolo	Valor (Potência de 10)	Valor (Decimal)
Giga	G	10^{9}	1.000.000.000
Mega	M	10^{6}	1.000.000
Kilo	k	10^{3}	1.000
mili	m	10^{-3}	0,001
micro	μ	10^{-6}	0,000 001
nano	n	10^{-9}	0,000 000 001
pico	p	10^{-12}	0,000 000 000 001

Em algumas publicações você verá "micro" sendo abreviado como "u" em vez do uso da letra grega mi (μ). Isso vem do fato de que antigamente livros e revistas eram escritos usando máquinas de escrever, não possuindo letras gregas. Algumas pessoas continuam usando esta abreviatura até hoje em dia, devendo ser evitada, já que computadores atualmente conseguem imprimir "μ" sem problemas.

Você deverá tomar um enorme cuidado ao efetuar contas usando as fórmulas que apresentaremos ao longo do livro, pois deverá primeiro converter a unidade usada para a unidade padrão. Isto é, correntes em mA deverão ser convertidas para ampères, resistências em kΩ deverão ser convertidas para ohms e assim por diante, já que as fórmulas apresentadas utilizam as unidades padrão.

Outra possibilidade para abreviar números muito grandes ou muito pequenos é o representá-los seguidos de uma multiplicação por uma potência de dez. Um lembrete para caso você não esteja familiarizado com a representação em forma de potência de dez. A forma 10^{n} indica o número a ser multiplicado seguido de *n* zeros e a forma 10^{-n} indica zero vírgula *n* zeros menos um e o número a ser multiplicado. Por exemplo, $2 \cdot 10^{6} = 2.000.000$ e $3 \cdot 10^{-3} = 0,003$. Caso o número a ser multiplicado tenha uma vírgula decimal, corta-se um zero do resultado para cada casa decimal existente, se *n* for positivo (se *n* for negativo não é preciso fazer qualquer conversão). Por exemplo $2,5 \cdot 10^{6} = 2.500.000$ (uma casa decimal, excluímos um zero do resultado), $2,52 \cdot 10^{6} = 2.520.000$ (duas casas decimais, excluímos dois zeros do resultado), mas $1,4 \cdot 10^{-6} = 0,0000014$ e $1,42 \cdot 10^{-6} = 0,00000142$ (não há corte de zeros).

Para converter números muito grandes em potência de dez, basta contar o número de dígitos à direita do número a ser convertido. Este será a potência. Por exemplo, 43.000.000 (seis dígitos à direita de "43") = $43 \cdot 10^{6}$. Neste exemplo, se você quiser "andar" uma casa decimal para repre-

sentar o número como 4,3 em vez de 43, basta adicionar o número de casas decimais que você deseja "andar" à potência, ou seja, este mesmo número pode ser representado como $4{,}3 \cdot 10^{7}$.

No caso de números muito pequenos, a conversão se procede da mesma maneira, porém contando o número de dígitos à direita da vírgula decimal, incluindo o número a ser convertido. Por exemplo, 0,00043 (cinco casas decimais após a vírgula decimal) = $43 \cdot 10^{-5}$. Se você quiser "andar" uma casa decimal para representar o número como 4,3 em vez de 43, basta diminuir a potência com o número de casas decimais que você deseja "andar", ou seja, este mesmo número pode ser representado como $4{,}3 \cdot 10^{-4}$.

O número a ser multiplicado pela potência de dez é normalmente reduzido a um único dígito antes da vírgula decimal. Ou seja, apesar de $56 \cdot 10^{-6}$ e $5{,}6 \cdot 10^{-5}$ representarem o mesmo número, a segunda forma de representação é a mais usual.

Arredondamentos

Em muitas contas o resultado terá várias casas decimais e, para maior comodidade, deveremos arredondar o número para um menor número de casas decimais, embora com isso nós tenhamos de sacrificar a precisão. Para arredondar um número, você deve começar da direita para a esquerda, a partir do último dígito. Há quatro situações possíveis:

- Se o dígito a ser removido for 0, 1, 2, 3 ou 4, basta removê-lo.
- Se o dígito a ser removido for 6, 7, 8 ou 9, você deverá incrementar o dígito à esquerda em uma unidade.
- Se o dígito a ser removido for 5 e o dígito à esquerda for ímpar, você deverá incrementar o dígito à esquerda em uma unidade.
- Se o dígito a ser removido for 5 e o dígito à esquerda for par, basta removê-lo.

Por exemplo, considere o número 4,462571251621. Mostramos a seguir como poderíamos arredondá-lo:

```
4,462571251621 = 4,46257125162 = 4,4625712516 = 4,462571252 = 4,46257125 =
4,462571 = 4,46257 = 4,4626 = 4,463 = 4,46 = 4,5 = 4
```

Lembrando que no caso de dízimas periódicas (números após a vírgula decimal que se repetem) você pode representá-las com um traço acima da parte que se repete. Por exemplo:

$2/3 = 0{,}6666666666 = 0{,}\overline{6} = 0{,}7$ (arredondado)

◆◆◆

Exercícios

1. Converta 0,00047 F para μF.
2. Converta 0,145 A para mA.
3. Converta 22000 Ω para kΩ.
4. Converta 350 mW para W.
5. Converta 22 pF para F.
6. Converta 0,000000047 F para nF.
7. Converta $5,6 \cdot 10^{5}$ Ω para kΩ.
8. Converta $4,7 \cdot 10^{-7}$ F para nF.
9. Converta $5,8 \cdot 10^{-1}$ W para mW.
10. Converta 330 μF para representação em potência de dez.
11. Converta 35 kΩ para representação em potência de dez.
12. Arredonde o resultado de 120 / 54 para uma casa decimal.
13. Arredonde o resultado de 58 / 2,3 para duas casas decimais.
14. Transforme 4,46 em um número inteiro (isto é, sem casas decimais).
15. Transforme 5,46 em um número inteiro (isto é, sem casas decimais).

Capítulo 2
Simbologia

Introdução

Há duas formas gráficas de se representar circuitos eletrônicos: diagrama de blocos e diagrama esquemático. O diagrama de blocos representa cada estágio de um circuito simplesmente através de uma caixa contendo o nome do estágio e as conexões existentes entre os estágios do circuito. Na Figura 2.1 nós exemplificamos este tipo de diagrama com um diagrama de blocos de um radinho de pilhas.

Figura 2.1: Exemplo de um diagrama de blocos (radinho de pilhas).

Como você pode ver, em um diagrama de blocos componentes normalmente não são desenhados ou representados.

Já no diagrama esquemático, os componentes do circuito são todos desenhados usando símbolos padronizados. Essa padronização permite que componentes sejam representados sempre com o mesmo símbolo, fazendo com que qualquer pessoa com conhecimento suficiente em eletrônica possa interpretar e montar o circuito. Na Figura 2.2 nós mostramos o diagrama esquemático de um radinho de pilhas FM.

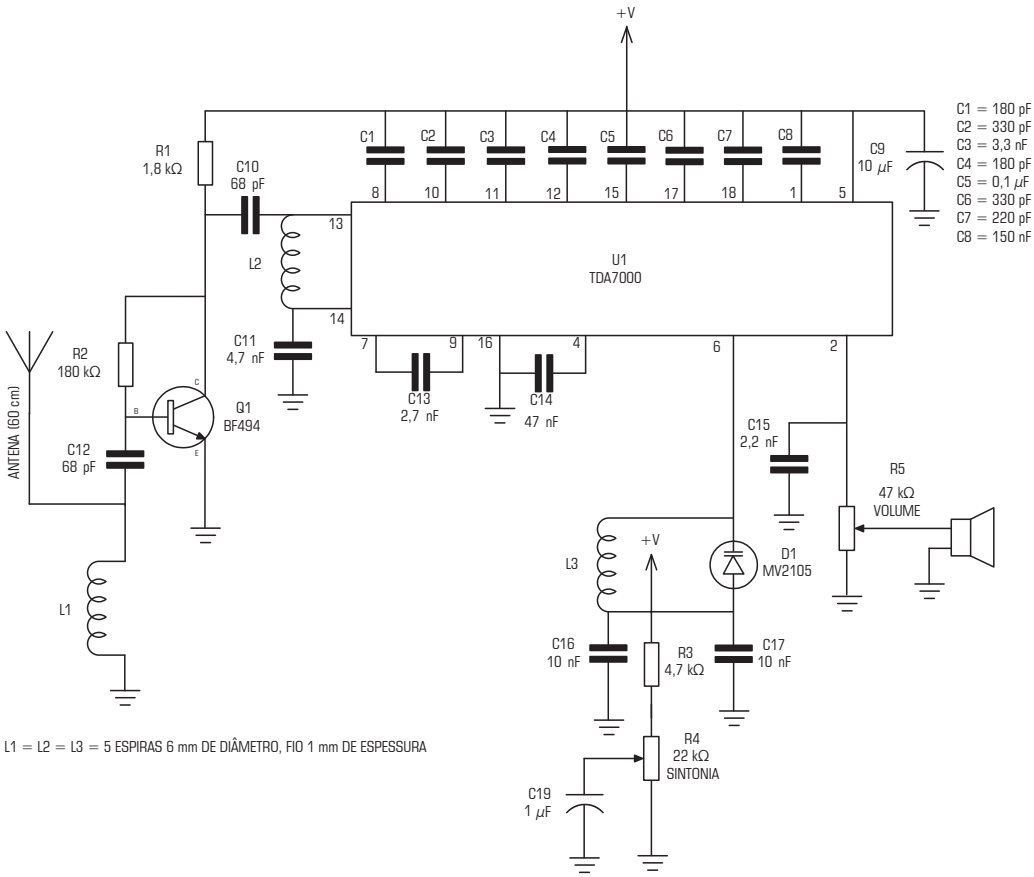


Figura 2.2: Exemplo de um diagrama esquemático (radinho de pilhas FM).

Ao lado de cada componente haverá sempre o seu valor e/ou um número de identificação do componente do circuito, normalmente uma letra identificando o tipo do componente e um número, identificando o número do componente no circuito. Por exemplo, resistores são normalmente identificados com a letra R, capacitores com a letra C, diodos com a letra D, bobinas com a letra L, transformadores com a letra T, transistores com a letra Q, circuitos integrados com as letras U, CI ou IC, etc. Na Tabela 2.1 nós mostramos as identificações mais comuns. Se os valores dos componentes não estiverem escritos no circuito, deverá haver uma página contendo a relação de componentes do circuito, listando os componentes e seus respectivos valores.

Tabela 2.1: Identificação de componentes.

Identificação	Tipo do Componente
BD	Ponte Retificadora
C	Capacitor
CON	Conector
D	Diodo
F	Fusível
FTE	Alto-Falante
HS	Dissipador de Calor
IC	Circuito Integrado
L	Indutor (Bobina)
LDR	Resistor Dependente de Luz (LDR)
LED	Diodo Emissor de Luz (LED)
J	Jumper (pedaço de fio conectando dois pontos)
MIC	Microfone
MOV	Varistor
Q	Transistor
R	Resistor
SPK	Alto-Falante
SW	Chave (Interruptor)
T	Transformador
TH	Termistor
U ou IC	Circuito Integrado
VD	Varistor
VC	Capacitor Variável
VR	Resistor Variável (Potenciômetro)
X ou XTAL	Cristal
Z ou ZD	Diodo Zener

É importante saber que a identificação de componentes só é válida para aquele circuito em particular. Por exemplo, no circuito da Figura 2.2 o valor de C1 vale 180 pF, mas em outros circuitos o valor do capacitor rotulado como "C1" poderá ser outro.

O uso de diagramas esquemáticos permite que não tenhamos que desenhar um circuito como ele realmente é no mundo real. Por exemplo, considere o circuito simples de duas pilhas alimentando um LED. A não ser que você seja um artista com muito tempo livre e consiga desenhar o que mostramos na Figura 2.3, é muito mais fácil representar este mesmo circuito na forma de um diagrama esquemático, como mostrado na Figura 2.4.

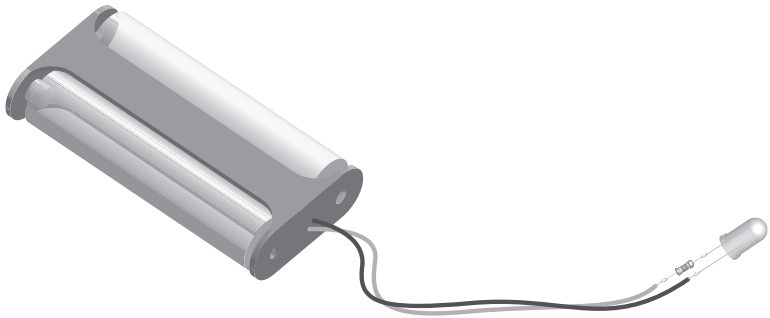


Figura 2.3: Um LED sendo alimentado por duas pilhas.

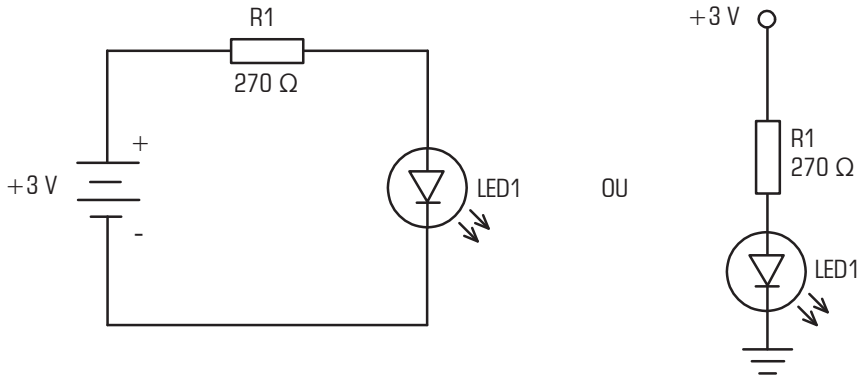


Figura 2.4: Diagrama esquemático do circuito.

Explicaremos como um LED funciona no Capítulo 27. Aqui queremos apenas ilustrar a conversão de um circuito "real" em um diagrama esquemático.

Conexões

Em diagramas esquemáticos, cada linha representa uma conexão, que pode ser feita através de um fio ou de uma trilha em uma placa de circuito impresso. Uma placa de circuito impresso (também chamada PCB, Printed Circuit Board) é uma chapa normalmente de fibra de vidro ou fenolite que "segura" os componentes do circuito. A placa de circuito impresso é também responsável por fazer conexões entre terminais de componentes, através de trilhas (normalmente de cobre) existentes. Assim, seguindo o exemplo da Figura 2.2, temos que o pino 7 do circuito integrado TDA7000 é conectado a um dos terminais do capacitor de 2,7 nF rotulado como "C13", e o outro terminal deste capacitor é conectado ao pino 9 desse circuito integrado. Mostramos outro exemplo na Figura 2.5, onde há uma conexão entre um dos terminais do resistor R1 e o terminal chamado "base" do transistor Q1.

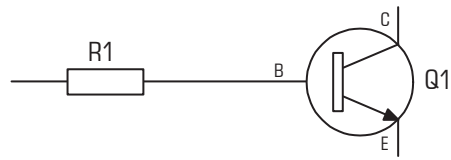


Figura 2.5: Exemplo de conexão.

Quando duas linhas se encontram, isto significa que há conexão entre elas. Há vários exemplos disso na Figura 2.2. Nela podemos ver que o pino 6 do circuito integrado é conectado tanto a um dos terminais da bobina L3 quanto ao catodo (terminal negativo) do diodo D1. Dependendo de quem efetuou o diagrama esquemático, a conexão de duas ou mais linhas pode conter uma "bolinha", para reforçar que há uma conexão. Damos outro exemplo na Figura 2.6, onde um dos terminais de R1 está conectado à base do transistor Q1 e a um dos terminais de R2. No lado direito da Figura 2.6 mostramos a conexão com a "bolinha" indicativa de conexão desenhada. Os circuitos da esquerda e da direita são idênticos e representam absolutamente a mesma coisa.

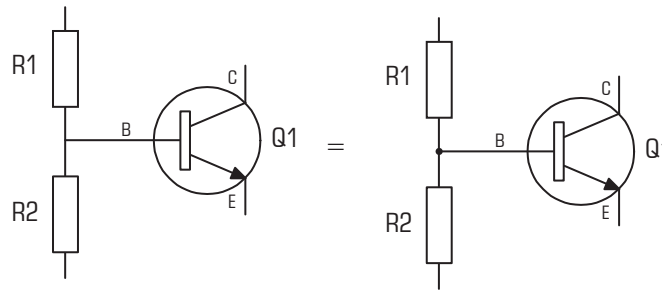
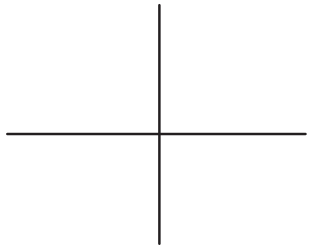
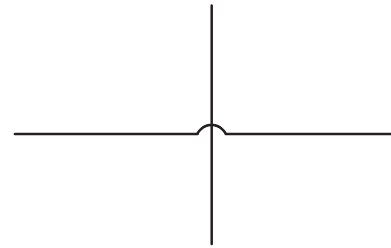


Figura 2.6: Exemplo de conexão.

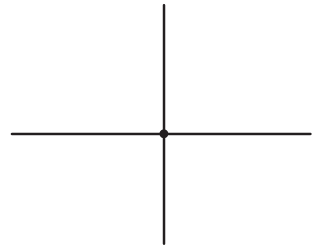
Quando duas linhas se cruzam, pode ou não haver conexão entre elas. Normalmente quando há um cruzamento com conexão, uma "bolinha" é desenhada para reforçar que há uma conexão. Quando essa bolinha não está presente, isto normalmente indica que não há conexão elétrica no cruzamento, sendo apenas um fio passando por cima de outro, mas sem conexão entre eles. Uma forma mais explícita de se informar que não há conexão entre duas linhas que estejam cruzando em um diagrama esquemático é desenhar um "salto" na linha no ponto de cruzamento, como mostramos na Figura 2.5.



CRUZAMENTO SEM CONEXÃO



CRUZAMENTO SEM CONEXÃO



CRUZAMENTO COM CONEXÃO

Figura 2.7: Cruzamentos.

Símbolos

Nós decidimos publicar neste capítulo um grande resumo dos símbolos dos principais componentes eletrônicos. Assim, ao se deparar com um símbolo desconhecido, você poderá vir a este capítulo para tentar identificá-lo e eventualmente ir ao capítulo onde explicamos mais sobre o componente em questão.

Alguns detalhes que são válidos para todos os símbolos:

- Uma seta no centro do componente indica que ele é um componente de valor variável. Por exemplo, um símbolo de resistor com uma seta no meio indica um resistor variável, isto é, um potenciômetro.
- Duas setas paralelas indicam luz. Assim, se elas apontam para o componente, isto indica que o componente é um sensor de luz. Se elas apontam para fora do componente, isto indica que o componente emite luz.

Fontes de Alimentação

Fontes de alimentação de um circuito podem ser representadas de várias formas. No caso de uma fonte de tensão contínua, esta pode ser representada com duas barras paralelas, uma menor do que a outra, a barra maior indicando o polo positivo da fonte. Quando queremos indicar uma pilha ou bateria contendo várias células, este símbolo é duplicado.

Outra maneira de se representar uma fonte de tensão contínua é usando uma barra (linha com uma seta ou círculo) para indicar o polo positivo e o símbolo de terra (GND ou "ground") para indicar o polo negativo. É importante entender que o símbolo de terra representa o polo negativo da alimentação contínua do circuito. Quando é necessário indicar uma conexão ao aterramento elétrico do circuito, disponível na rede elétrica onde o circuito é conectado, é usado um símbolo chamado "massa".

Para fonte de alimentação alternada usa-se um círculo contendo uma senoide em seu interior (este símbolo também pode identificar um gerador de onda senoidal) ou então uma tomada elétrica, quando estamos falando da tensão alternada da rede elétrica.

Por fim, mostramos também o símbolo de fonte de corrente, que é usado em modelos teóricos.

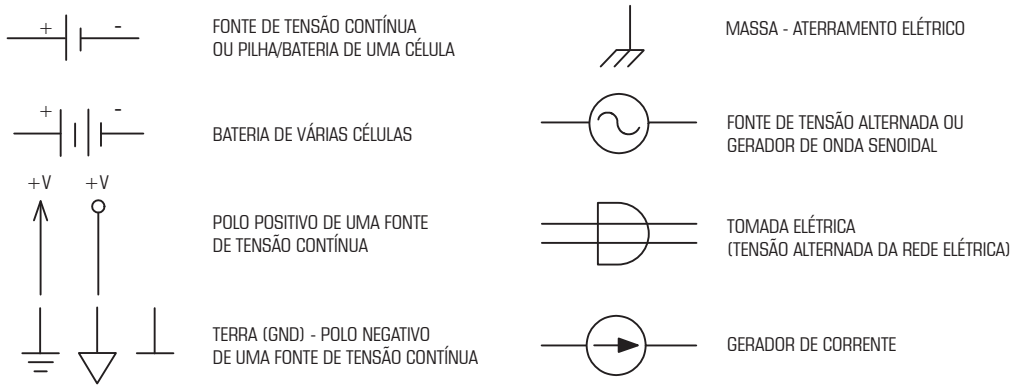


Figura 2.8: Símbolos de alimentação.

Chaves e Interruptores

Há uma infinidade de chaves e interruptores que podem ser representados através de símbolos, e na Figura 2.9 nós incluímos apenas os mais comuns. Aproveitamos também para incluir uma chave eletromecânica (relé).

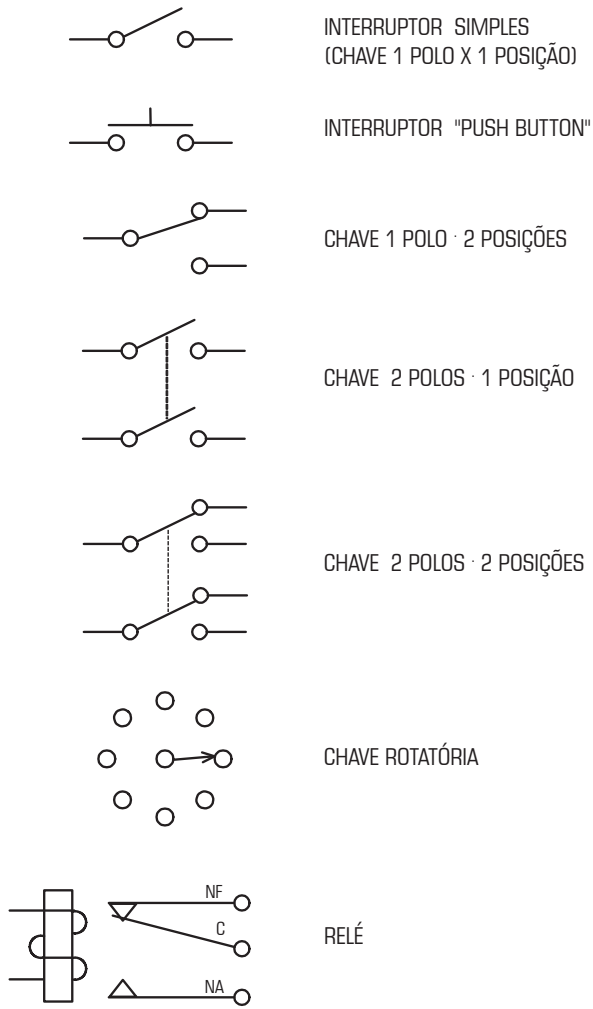


Figura 2.9: Símbolos de chaves e interruptores.

Resistores

Resistor é o nome dado a qualquer componente que se oponha à passagem elétrica, embora exista um componente com este nome que pode ser comprado em lojas de componentes eletrônicos e que apresenta uma resistência elétrica de um determinado valor. O símbolo do resistor pode ser um "zigue-zague" ou um retângulo (ver Figura 2.10). Neste livro estaremos usando o símbolo de "zigue-zague" para representar um resistor "genérico", isto é, qualquer componente que apresente resistência à passagem da corrente elétrica, enquanto que usaremos o símbolo retangular para representar especificamente o componente chamado resistor que é vendido em lojas especializadas.

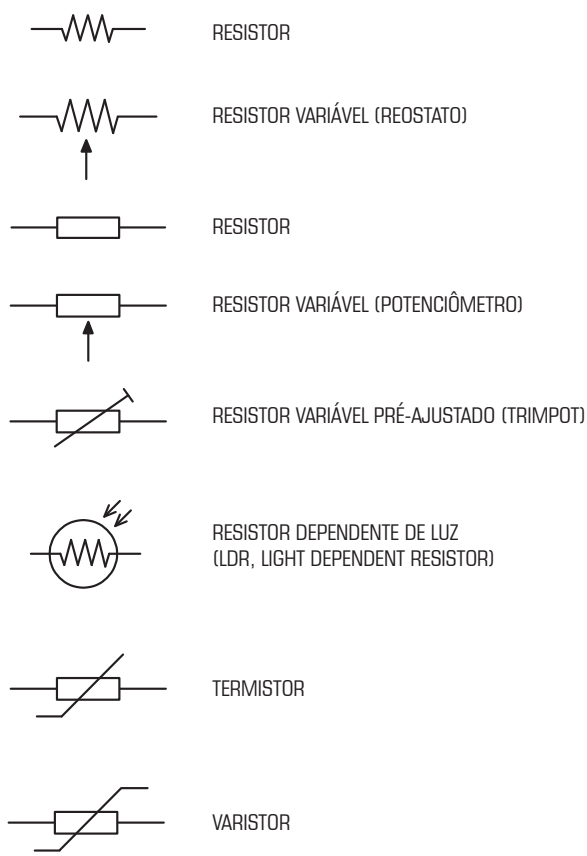


Figura 2.10: Símbolos de resistências, resistores e componentes derivados.

Capacitores

O símbolo básico do capacitor é formado por duas linhas paralelas. Quando o componente for polarizado, haverá indicação de polo positivo e polo negativo, que pode ser feita através da adição dos sinais de "+" e "-", ou então usando um símbolo onde uma das linhas foi alterada de forma a indicar polaridade – ver Figura 2.11. O símbolo onde uma das linhas foi curvada para indicar o polo negativo é o mais usado.

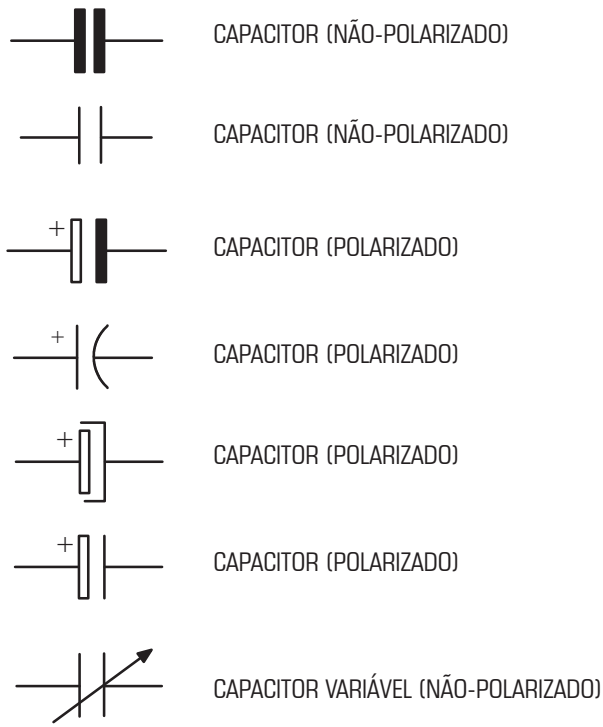


Figura 2.11: Símbolos de capacitores.

Indutores

O símbolo usado para indutores (bobinas) inclui informação do material usado em seu núcleo: ar, ferro ou ferrite, como mostrado na Figura 2.12.

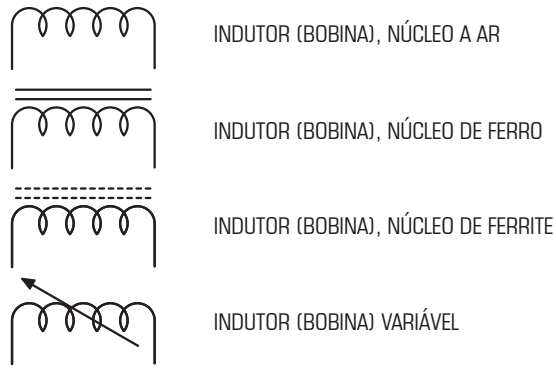


Figura 2.12: Símbolos de indutores.

Transformadores

A simbologia usada por transformadores segue o padrão usado por indutores. Na Figura 2.13 usamos apenas dois fios de cada lado do transformador, porém transformadores podem ter mais fios, que serão obviamente desenhados em sua simbologia.

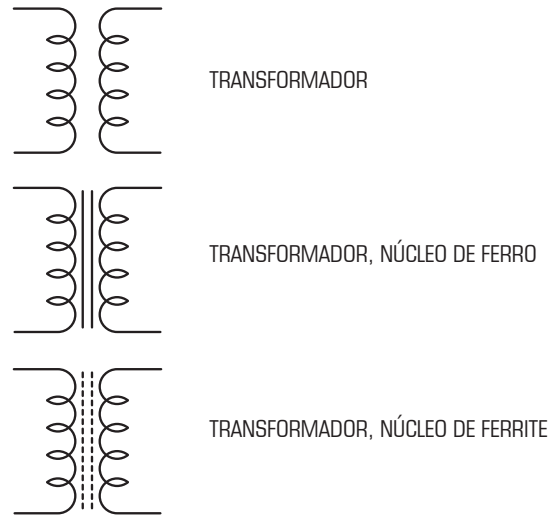


Figura 2.13: Símbolos de transformadores.

Diodos

Os símbolos para os principais tipos de diodo existentes podem ser vistos na Figura 2.14. A linha perpendicular no símbolo indica o terminal negativo (chamado catodo) do componente. O outro terminal é chamado anodo. O círculo ao redor do símbolo é opcional e muitas vezes não é desenhado.

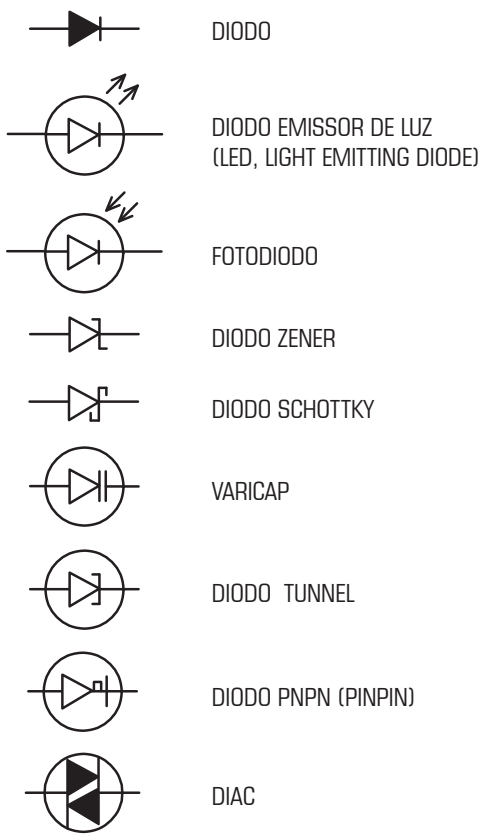
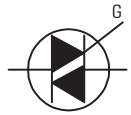


Figura 2.14: Símbolos de diodos.

Tiristores

Os símbolos para tiristores podem ser vistos na Figura 2.15. Assim como ocorre com os símbolos para diodos, o círculo ao redor do símbolo é opcional e muitas vezes não é desenhado.

RETIFICADOR CONTROLADO DE SILÍCIO
(SCR, SILICON CONTROLLED RECTIFIER)

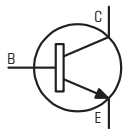


TRIAC

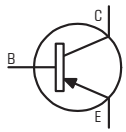
Figura 2.15: Símbolos de tiristores.

Transistores

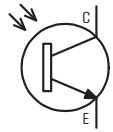
Os símbolos para os principais tipos de transistores existentes podem ser vistos na Figura 2.16. O círculo ao redor do símbolo é opcional e muitas vezes não é desenhado.



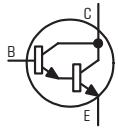
TRANSISTOR DE JUNÇÃO NPN



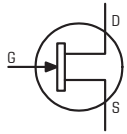
TRANSISTOR DE JUNÇÃO PNP



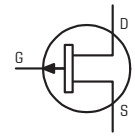
FOTOTRANSISTOR



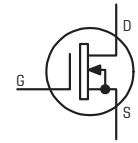
TRANSISTOR DARLINGTON



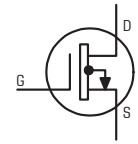
TRANSISTOR DE EFEITO DE
CAMPO - CANAL N (FET, FIELD EFFECT
TRANSISTOR)



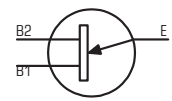
TRANSISTOR DE EFEITO DE
CAMPO - CANAL P (FET, FIELD
EFFECT TRANSISTOR)



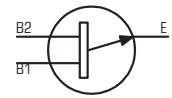
TRANSISTOR MOSFET - CANAL N



TRANSISTOR MOSFET - CANAL P



TRANSISTOR UNIJUNÇÃO - CANAL N



TRANSISTOR UNIJUNÇÃO - CANAL P

Figura 2.16: Símbolos de transistores.

Instrumentos de Medida

Instrumentos de medida são representados com um círculo contendo a unidade a ser medida em seu interior. Por exemplo, "Ω" para o caso de um medidor de resistência ("ohmímetro"), "A" para o caso de um medidor de corrente ("amperímetro") e "V" para o caso de um medidor de tensão ("voltímetro"). No Capítulo 16, veremos outros símbolos possíveis para o galvanômetro.

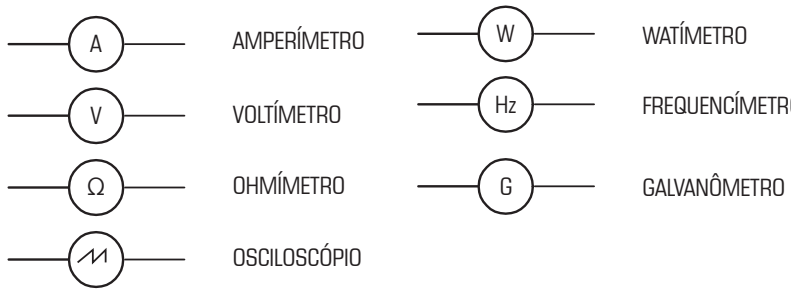


Figura 2.17: Símbolos de instrumentos de medida.

Outros

Há literalmente milhares de símbolos de componentes eletrônicos e, por motivos de espaço, incluímos neste capítulo apenas os mais comuns. Na Figura 2.18 incluímos outros símbolos de componentes comuns e que não caem nas classificações apresentadas anteriormente.

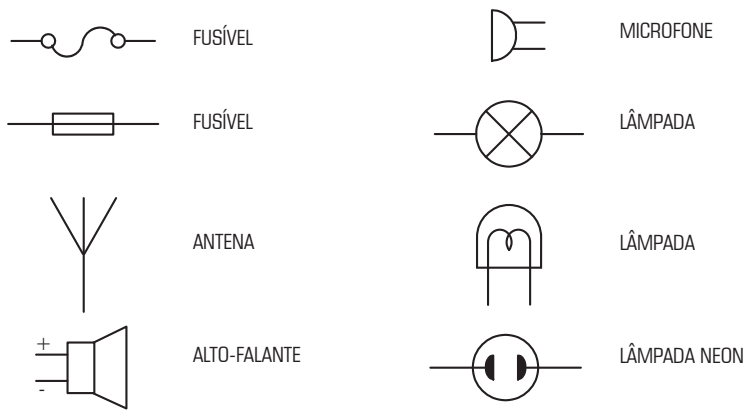


Figura 2.18: Outros símbolos comuns.

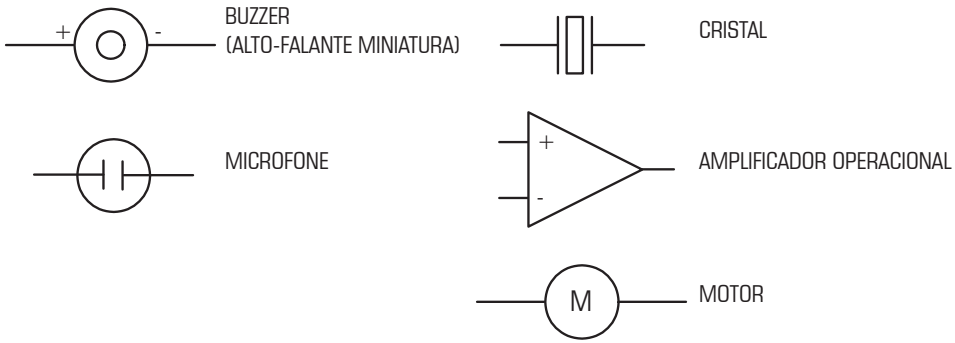


Figura 2.18: Continuação.

◆◆◆

Exercícios

1. Analise o circuito da Figura 2.19 e diga o que ele faz.

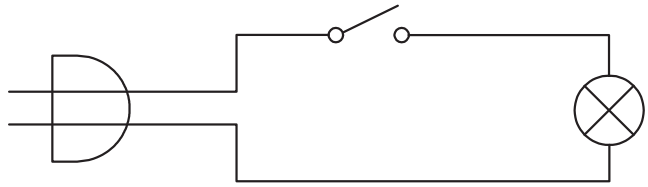


Figura 2.19: Analise este circuito.

2. Analise o circuito da Figura 2.20 e diga o que ele faz.

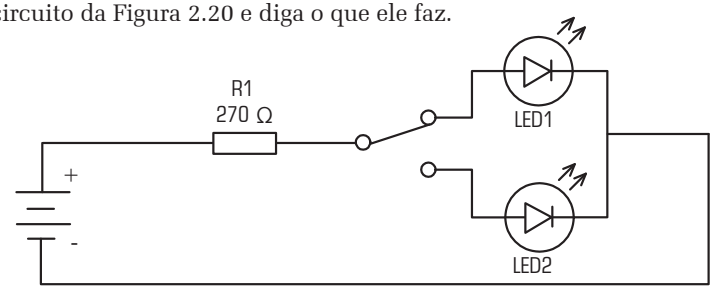


Figura 2.20: Analise este circuito.

Parte 2
Eletricidade Básica

Para entender eletrônica, você precisa aprender sobre eletricidade. Nesta parte do livro você aprenderá o que é eletricidade e suas principais grandezas: carga elétrica, tensão, corrente, resistência elétrica, impedância e potência, além da relação da eletricidade com o magnetismo. Com isso, automaticamente você aprenderá sobre o funcionamento dos componentes eletrônicos passivos, tais como resistores, indutores, capacitores e transformadores. Com esses conhecimentos você verá que eletrônica não é um bicho de sete cabeças e criará a base para entender tudo sobre o funcionamento dos componentes eletrônicos mais "avançados".

Capítulo 3
O que é a Eletricidade?

Introdução

Demócrito (460-370 a.C.), antigo filósofo grego, criou a teoria de que todos os corpos existentes eram formados pela junção de inúmeras minúsculas partículas, invisíveis ao olho humano, chamadas *átomos*. A maneira com que os átomos se juntam entre si dá a forma aos infinitos corpos existentes no universo. Assim, dois objetos de mesma massa (isto é, com a mesma quantidade de átomos) podem ser completamente diferentes por causa da maneira com que os seus átomos estão agrupados. Segundo a teoria de Demócrito, o átomo era a menor parte da matéria, isto é, qualquer corpo poderia ser dividido até o ponto em que só sobrassem seus átomos isoladamente.

Mais recentemente descobriu-se que os átomos na verdade não são partículas sólidas e indivisíveis, mas sim formadas por outras três partículas (chamadas partículas subatômicas): os elétrons (que têm carga elétrica negativa), os prótons (com carga elétrica positiva) e os nêutrons (sem carga elétrica). Os prótons e os nêutrons ficam bem próximos uns dos outros, em um grupo compacto, formando o núcleo do átomo. Já os elétrons movimentam-se ao redor do núcleo do átomo. Hoje se sabe que os prótons e nêutrons podem ser divididos em partículas ainda menores, chamadas *quarks*.

Os nêutrons, por sua vez, não possuem polaridade alguma, são partículas neutras. Como os prótons do núcleo do átomo estão bem próximos, eles possuem a tendência de se repelir, o que faria com que os prótons se "soltassem" do núcleo, desfazendo o átomo. Existe, no entanto, uma propriedade dos prótons e nêutrons chamada "força nuclear forte", que faz com que essas partículas sempre se atraiam quando muito próximas. Dessa forma, os nêutrons servem para

equilibrar o núcleo do átomo, permitindo que os prótons possam ficar muito próximos uns dos outros sem que essa tendência de fuga siga adiante, pois eles sofrem a atração da força nuclear sem a repulsão da força elétrica.

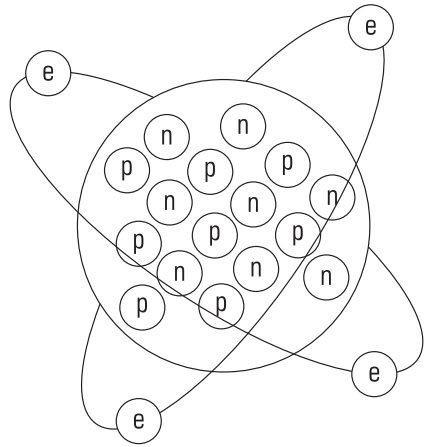


Figura 3.1: Um átomo e suas três partículas subatômicas: prótons, elétrons e nêutrons.

A quantidade de elétrons, prótons e nêutrons que cada átomo possui gera um elemento diferente, como o hidrogênio, o oxigênio e o carbono, como mostra a famosa Tabela Periódica dos Elementos, que tanto vimos em nossas aulas de química na escola.

Carga Elétrica

Ao longo da história da humanidade, vários fenômenos "estranhos" foram percebidos e começaram a ser estudados. Alguns deles podem ser vistos em nosso cotidiano: sacos plásticos que "grudam" uns nos outros, pedacinhos de papel ou isopor atraídos por objetos e choques ao tocarmos em um objeto metálico são alguns exemplos.

A causa desses fenômenos é uma propriedade da matéria chamada *carga elétrica*. A carga elétrica pode ser de dois tipos: positiva ou negativa. Descobriu-se que objetos carregados com cargas elétricas do mesmo tipo se repelem, enquanto objetos com cargas de sinais opostos se atraem. A unidade de medida da carga elétrica é o *coulomb*, e seu símbolo é a letra C.

Os objetos com os quais lidamos normalmente têm carga elétrica nula, mas isso não significa que dentro dele não existem cargas elétricas: significa apenas que a quantidade de carga positiva e negativa do corpo tem o mesmo valor, e portanto a carga total do objeto é zero.

Como explicamos, os prótons (encontrados no núcleo dos átomos) têm carga elétrica positiva, enquanto os elétrons (que ficam em torno do núcleo) têm carga negativa. O interessante é que o valor da carga dessas duas partículas é igual, diferenciando-se apenas pelo sinal. Assim, a carga elétrica de um próton é de $+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, enquanto a carga elétrica de um elétron vale $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

A tendência dos átomos é ficarem neutros, ou seja, com igual número de prótons e elétrons, de modo que sua carga elétrica total seja zero. Além disso, os elétrons ficam divididos em camadas e os átomos sempre tentam se combinar de forma que essas camadas estejam completas, e graças a isso é que os átomos formam moléculas e substâncias, além do universo como conhecemos.

Olhando atentamente a Figura 3.1, você pode observar que é muito mais fácil arrancar um elétron de um átomo do que um próton, já que o elétron está se movimentando ao redor do átomo, enquanto que o próton está compactado em um núcleo.

Se um átomo perder um ou mais elétrons da sua camada mais externa, o número de prótons supera o número de elétrons e o átomo passa a conter uma carga elétrica efetiva positiva. Nesta condição o átomo é chamado de *íon positivo*. Se um átomo ganhar elétrons, a sua carga elétrica efetiva torna-se negativa. O átomo é então chamado de *íon negativo*. O processo através do qual os átomos ou recebem ou cedem elétrons é chamado *ionização*.

Os materiais podem ser divididos em condutores ou isolantes (no Capítulo 27 explicaremos sobre um terceiro tipo, os semicondutores), e a grande diferença entre eles está na presença de "elétrons livres", ou seja, elétrons que não estão presos em um átomo em particular, mas que podem mover-se de um átomo para outro dentro do material. Assim, materiais que têm elétrons livres são condutores pois as cargas elétricas podem mover-se dentro deles, enquanto nos isolantes não há elétrons livres e portanto não pode haver circulação de carga elétrica.

Um detalhe interessante é que nosso planeta é um grande condutor e, na sua totalidade, permanece sempre neutro.

Eletrização

Como discutimos, os corpos na natureza estão normalmente neutros. Mas como podemos fazer com que um corpo fique carregado eletricamente? Esse processo é chamado de *eletrização* e há três formas básicas de ele acontecer: atrito, contato e indução.

A eletrização por atrito acontece quando, como o próprio nome diz, dois materiais são atritados, e elétrons são arrancados de um para outro. Uma forma fácil de conseguir isso é esfregar um pedaço de vidro ou plástico em um tecido de lã ou seda. Obviamente, um dos objetos perderá elétrons e portanto ficará com carga positiva (mais prótons do que elétrons) e o outro receberá elétrons e ficará com carga negativa (por ficar com mais elétrons do que prótons). Esse fenômeno é que faz com que um pente ou uma caneta, esfregados no cabelo ou em determinados tecidos, passe a atrair pequenos objetos tais como pequenos pedaços de papel e isopor. Também é a

eletrização por atrito que faz com que, às vezes, levemos um choque ao tocar em um carro (que se carrega pelo atrito com o ar) ou mesmo em uma maçaneta (nosso corpo pode ficar carregado pelo atrito dos nossos pés com o chão).

A eletrização por contato acontece quando um corpo já carregado é encostado em um corpo neutro. Parte da carga elétrica passa de um corpo para o outro. É o que acontece quando tomamos um choque ao colocarmos o dedo em uma tomada elétrica.

Na eletrização por indução, ao aproximarmos um objeto carregado de outro neutro, a própria força de atração ou repulsão elétrica faz com que as cargas do objeto neutro movam-se em seu interior, criando uma zona com carga positiva e outra com carga negativa. É através deste fenômeno que transformadores funcionam, como estudaremos no Capítulo 26.

Essa "força" de atração e repulsão de prótons e elétrons é genericamente chamada *eletricidade*. Como vimos, nos sólidos é muito mais fácil um elétron se deslocar do que um próton, portanto estaremos lidando basicamente com os elétrons. O potencial elétrico de um sistema é chamado *tensão elétrica*. O fluxo de elétrons que circula em um condutor (qualquer meio que possa servir de transporte para os elétrons) é chamado *corrente elétrica*. A oposição que esse meio apresenta à passagem da corrente elétrica é chamada *resistência elétrica*.

A tensão elétrica é medida em uma unidade chamada *volt* e abreviada pela letra V, a corrente elétrica é medida em uma unidade chamada *ampère* e abreviada pela letra A e a resistência elétrica é medida em uma unidade chamada *ohm* e abreviada pela letra grega ômega maiúscula (Ω).

◆◆◆

Exercícios

1. Elétrons possuem carga elétrica _____.
2. O movimento de elétrons produz uma _____.
3. A unidade de medida de carga elétrica é o _____.
4. A oposição à passagem de corrente elétrica é chamada _____.
5. Um material é chamado condutor quando tem muitos ou poucos elétrons livres em seu interior?
6. Um material é chamado isolante quando tem muitos ou poucos elétrons livres em seu interior?

Capítulo 4
Tensão Elétrica Contínua

Introdução

A corrente elétrica é o fluxo ordenado de cargas elétricas deslocando-se de um local para outro. Nos líquidos e gases, as cargas elétricas que se movimentam são íons (átomos carregados positivamente ou negativamente), mas, nos condutores sólidos, a corrente elétrica é constituída apenas pelo movimento de elétrons.

A corrente elétrica só existe quando há *diferença de potencial* entre dois pontos, isto é, quando um ponto está com excesso de elétrons e outro está com falta de elétrons e caso exista um caminho fechado por onde ela possa circular (ou seja, exista uma ligação física entre esses dois pontos), chamado *circuito*.

A diferença de potencial ou a "força" que move os elétrons de um ponto ao outro é chamada *tensão elétrica*. A tensão elétrica é medida através de uma unidade chamada *volt* e ela é bastante comum em nosso dia a dia. Popularmente a tensão elétrica é também chamada "voltagem", embora esta nomenclatura deva ser evitada.

Essa ideia ficará mais clara ao estudarmos o funcionamento de pilhas e baterias.

Pilhas vs. Baterias

Antes de prosseguirmos, gostaríamos de esclarecer uma dúvida comum: qual é a diferença entre pilhas e baterias?

A palavra "pilha" foi primeiro usada pelo físico italiano Alessandro Volta, seu inventor. O seu nome deriva da construção de sua fonte de tensão contínua, que era formada por uma pilha de placas de zinco e cobre, e daí o nome de sua invenção.

O termo "bateria" foi primeiro usado pelo inventor e presidente norte-americano Benjamin Franklin (o mesmo camarada que está na nota de US$ 100) para nomear um conjunto de garrafas de Leiden (cada garrafa era na realidade um capacitor). "Bateria" é um termo originalmente militar, que indica um conjunto de armas funcionando em conjunto. Cada garrafa era capaz de armazenar uma quantidade de carga elétrica, e Franklin juntou várias delas para aumentar a capacidade de armazenamento do conjunto. É interessante notar que originalmente o termo "bateria" foi cunhado para representar um conjunto de capacitores armazenando carga elétrica. No entanto, devido à fama de Benjamin Franklin nos EUA, norte-americanos incorporaram a palavra "bateria" em vez de "pilha" em seu vocabulário.

Em outras palavras, quando as primeiras pilhas comerciais foram lançadas no Brasil (pilhas "pequena", "média" e "grande", agora chamadas AA, C e D) passamos a usar o termo "pilha" para identificá-las, ao passo que os norte-americanos as chamaram de "bateria".

Por ser um termo que originalmente significa "conjunto", inicialmente em português usou-se o termo "bateria" para dispositivos formados por mais de uma pilha (célula voltaica) em seu interior. Por exemplo, a popular bateria retangular de 9 V possui na realidade seis células (pilhas) de 1,5 V em seu interior e a bateria de 12 V usada em carros normalmente possui seis células (pilhas) de 2 V em seu interior. Sendo assim, ambas são chamadas de "bateria" em vez de "pilha".

No entanto, com o surgimento nos últimos anos dos mais diversos tipos de pilhas elétricas no mercado, nós passamos a chamar essas novas pilhas de "bateria" em vez de "pilha", porque traduzimos erroneamente "battery" (termo que pode significar tanto "pilha" quanto "bateria", pois em inglês não há esta distinção) como "bateria" em vez de "pilha". Por exemplo, baterias usadas em relógio possuem apenas uma célula, mas normalmente as chamamos de "bateria", quando, pelo padrão que vínhamos usando no Brasil, deveríamos chamá-la de "pilha".

Em resumo, em teoria os termos "pilha" e "bateria", em português, deveriam significar coisas distintas – uma pilha elétrica de apenas uma célula voltaica e uma pilha elétrica com mais de uma célula voltaica, respectivamente – mas, por erro de tradução e uso (pois em inglês só existe um único termo para as duas coisas, "battery"), acabamos atualmente usando os dois termos indistintamente no que se refere a pilhas e baterias mais modernas.

Desta forma, os termos "pilha" (europeu) e "bateria" (norte-americano) expressam a mesma coisa, uma fonte de tensão contínua obtida através de uma reação química. Quando é importante para o contexto informar que uma bateria possui mais de uma célula voltaica em seu interior, usamos a expressão "bateria de *n* células".

Ao longo deste livro usaremos a definição clássica para o português “pilha”, como sendo uma pilha de apenas uma célula voltaica e “bateria”, como sendo um conjunto de células voltaicas.

Funcionamento de Pilhas e Baterias

Uma pilha funciona justamente fazendo com que um de seus polos – o negativo – possua um excesso de elétrons, enquanto que o outro polo – o positivo – possua falta de elétrons. A “força” de deslocamento dos elétrons de uma pilha é medida através de sua tensão elétrica, dada em volts. Por exemplo, as pilhas comuns usadas por radinhos de pilha e controles remotos são todas de 1,5 V, independentemente do seu tamanho. Existem pilhas e baterias com outras tensões elétricas, como 3 V, 9 V e 12 V, por exemplo. Na Figura 4.1 nós mostramos a vista explodida de uma pilha. Os elétrons estão simbolizados com o sinal “-” enquanto que cargas necessitando de elétrons estão simbolizadas com o sinal “+”.

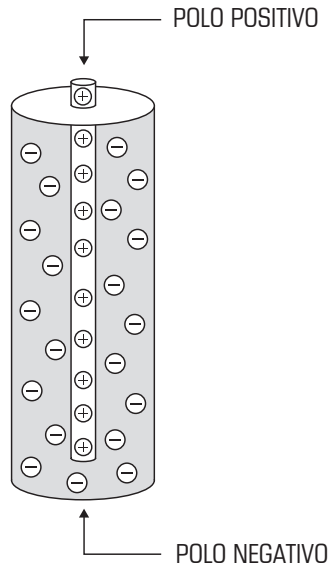


Figura 4.1: Funcionamento de uma pilha.

Dessa forma, em um circuito eletrônico, a pilha funciona como uma “bomba”, empurrando elétrons de um lado (de seu polo negativo) e puxando para outro lado (o seu polo positivo), passando antes pelo circuito que se deseja alimentar. Na Figura 4.2 temos uma lâmpada ligada

a uma pilha: ela acende a partir do momento em que há um caminho entre o polo negativo e o polo positivo da pilha, criando um fluxo de elétrons (esse fluxo é chamado *corrente elétrica* e está indicado com setas na figura). Se o caminho for interrompido (removendo-se um dos fios da pilha, por exemplo), não há um caminho fechado (circuito) entre o polo positivo e o negativo da pilha e, com isso, não há corrente elétrica. Por isso, a lâmpada não acenderá.

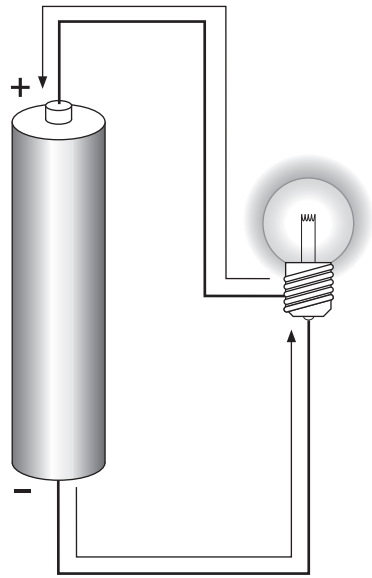


Figura 4.2: Exemplo de um circuito.

A lâmpada representada no circuito é uma pequena lâmpada, dessas usadas em lanternas, e não uma lâmpada dessas usadas em nossa casa. Lâmpadas – assim como diversos outros componentes elétricos e eletrônicos – possuem uma tensão de alimentação nominal, ou seja, uma tensão para a qual foram projetadas para funcionarem corretamente. As lâmpadas usadas em lanternas normalmente são lâmpadas de 3 V, isto é, a tensão máxima que a lâmpada aguenta é de 3 V. Se for alimentada com uma tensão superior a essa, a lâmpada queima. Se você pegar uma lâmpada de lanterna e ligar na tomada de casa (que tipicamente fornece 127 V, como estudaremos no próximo capítulo), a lâmpada explodirá. Se você alimentar a lâmpada com uma tensão menor do que ela "aguenta", não acontecerá nada de mais com a lâmpada, que simplesmente emitirá um brilho mais fraco. Aliás, é justamente assim que funcionam os dimmers, aparelhos usados para diminuir o brilho de lâmpadas: um dimmer controla a tensão que é fornecida à lâmpada, diminuindo essa tensão para que o brilho da lâmpada diminua.

Bem, voltando às pilhas, elas são feitas de um material químico. Isso significa que a quantidade de carga elétrica disponível em uma pilha é finita. Por isso é que as pilhas "acabam": toda a sua carga elétrica já foi neutralizada, isto é, os elétrons já passaram para o polo positivo da pilha e completaram a falta de elétrons lá existente. A tensão elétrica estampada no corpo da pilha, como 1,5 V, por exemplo, é a tensão que a pilha fornece quando ela está novinha em folha. À medida que ela vai sendo usada, seus elétrons vão sendo consumidos e sua tensão vai abaixando, até chegar a zero.

Quanto maior o tamanho físico da pilha, mais material químico cabe dentro dela, fazendo com que ela dure mais. Uma pilha grande (tamanho C) dura mais tempo que uma pilha pequena (tamanho AA), que por sua vez dura mais tempo que uma pilha palito (tamanho AAA). É claro que essa comparação de "tempo" só é válida caso a gente conecte circuitos que possuam um mesmo "consumo" às pilhas e estejamos comparando pilhas construídas com os mesmos materiais químicos. Em outras palavras, o tamanho da pilha diz a "autonomia" da pilha, ou seja, quanto tempo ela durará. É por esse motivo que normalmente pilhas pequenas são usadas em circuitos que consomem pouco (como radinhos, controles remotos etc.), enquanto que pilhas grandes são usadas por circuitos que consomem muito (como rádios equipados com CD e com caixas de som de alta potência). Se uma pilha pequena for conectada a um circuito de alto consumo, ela não durará muito tempo, ao passo que, se uma pilha grande for conectada a um circuito de baixo consumo, ela "nunca" será gasta; por motivos de tamanho (você consegue imaginar um controle remoto com duas pilhas grandes?) e preço, os engenheiros preferem projetar circuitos que usem pilhas pequenas em circuitos de baixo consumo.

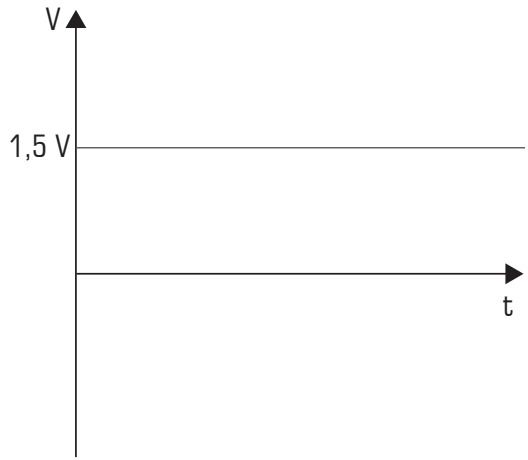


Figura 4.3: Tensão contínua.

Outro fator que define o tempo que uma pilha durará é o material químico usado. É por esse motivo que as pilhas alcalinas duram mais tempo que as pilhas comuns (ácidas), mesmo tendo um mesmo tamanho físico: elas utilizam outro material químico.

A tensão elétrica fornecida por uma pilha é também chamada *tensão contínua*. Esse nome vem do fato de que a pilha fornece sempre a mesma tensão, de uma maneira fixa (é claro que essa tensão vai baixando à medida que a pilha vai ficando "fraca"). O gráfico da Figura 4.3 ilustra o comportamento da tensão elétrica fornecida por uma pilha de 1,5 V ao longo do tempo.

Qualquer aparelho ou circuito capaz de fornecer tensão elétrica é também chamado *fonte de tensão* ou *fonte de alimentação*. Uma pilha é, portanto, uma *fonte de tensão contínua*.

Simbologia

Fontes de tensão contínua são representadas com duas barras paralelas, uma menor do que a outra, a barra maior indicando o polo positivo da fonte. Quando queremos indicar uma bateria contendo várias células, este símbolo é duplicado.

Outra maneira de se representar uma fonte de tensão contínua é usando uma barra (linha com uma seta ou círculo) para indicar o polo positivo e o símbolo de terra (GND ou "ground") para indicar o polo negativo. É importante entender que o símbolo de terra representa o polo negativo da alimentação contínua do circuito. Quando é necessário indicar uma conexão ao aterramento elétrico do circuito, disponível na rede elétrica onde o circuito é conectado, é usado um símbolo chamado "massa".

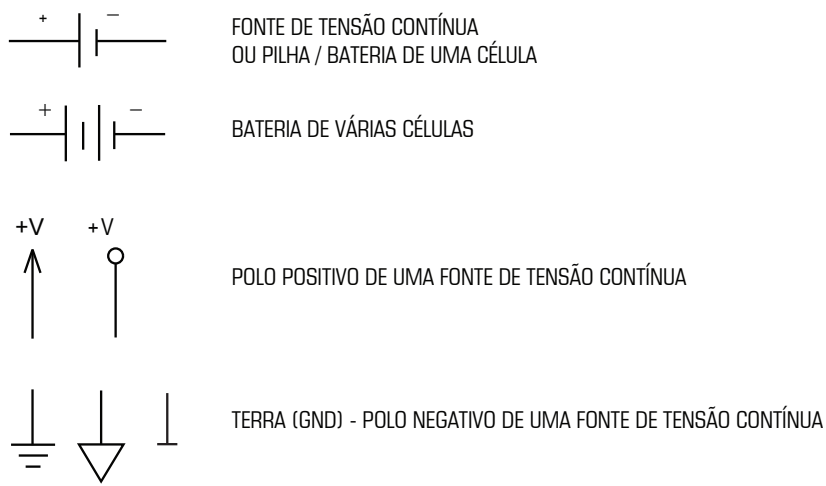


Figura 4.4: Símbolos de fontes de tensão contínua.

Desta forma, um circuito simples de uma lâmpada conectada a uma pilha pode ser representado como mostrado na Figura 4.5.

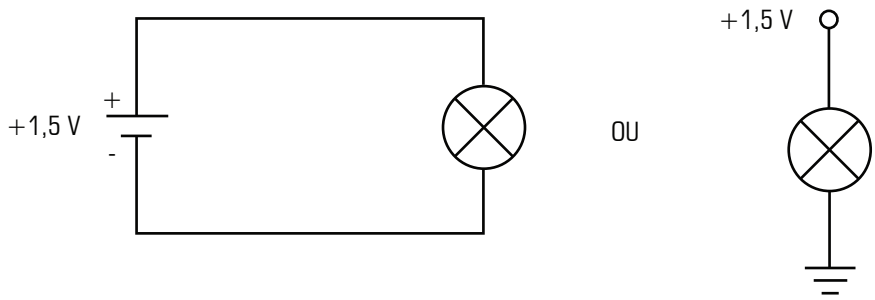


Figura 4.5: Circuito esquemático de uma pilha alimentando uma lâmpada.

Diferença de Potencial

A tensão (diferença de potencial) entre dois pontos pode sempre ser representada pela seguinte equação:

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (4.1)$$

Onde V_{AB} é a tensão entre o ponto A e o ponto B, V_A é o potencial do ponto A e V_B é o potencial do ponto B.

Assim, se o ponto A tem um potencial de 12 V e o ponto B tem um potencial de 0 V, a diferença de potencial entre os dois (tensão entre os pontos A e B) é de +12 V.

Se o ponto A tem um potencial de 12 V e o ponto B tem um potencial de 5 V, a diferença de potencial entre os dois pontos é de 7 V (12 V - 5 V).

Se o ponto A tem um potencial de 12 V e o ponto B também tem um potencial de 12 V, a diferença de potencial entre os dois pontos é de 0 V (12 V - 12 V).

Se o ponto A tem um potencial de 0 V e o ponto B tem um potencial de 12 V, a diferença de potencial entre os dois pontos é de -12 V (0 V - 12 V).

A tensão elétrica é positiva ou negativa dependendo do referencial. No caso de pilhas, normalmente usamos como referencial que o polo negativo de uma pilha tem um potencial elétrico de zero volt e o polo positivo, 1,5 V. No entanto, se invertermos a pilha e assumirmos que o polo positivo é que tem um potencial de zero volt, então teremos uma pilha de -1,5 V.

Daqui para frente, quando você vir uma fonte de alimentação com um valor negativo, lembre-se dessa história: uma tensão negativa é como se fosse uma "pilha invertida". Por exemplo, vamos supor uma fonte de alimentação contínua que tenha três saídas: +12 V, GND e -12V. O terra (ou GND) é como se fosse o "polo negativo" da nossa pilha. A saída +12 V possui uma diferença de potencial de 12 V em relação ao terra, ou seja, é como se fosse uma bateria de 12 V. Já a saída de -12 V possui uma diferença de potencial de -12V em relação ao terra, ou seja, é como se fosse uma bateria de 12 V "invertida", onde estamos assumindo que o polo positivo dessa bateria tem um potencial de zero volt e o polo negativo é que tem um potencial de 12 V.

Continuando o exemplo, temos ainda uma diferença de potencial de 24 V entre a saída +12 V e a saída -12 V desta fonte de alimentação. Se quiséssemos criar uma fonte de +24 V a partir dessa fonte, basta considerarmos como polo positivo a saída +12 V e como polo negativo (terra) a saída -12 V. Pois nesse caso, teremos $V_A = 12$ V, $V_B = -12$ V, e aplicando a equação teremos que $V_{AB} = 12$ V - (-12 V) = 24 V. Já se quisermos criar uma fonte de -24 V, basta considerarmos como polo positivo a saída -12 V e como polo negativo (terra) a saída +12 V. Nesse caso teremos $V_A = -12$ V, $V_B = +12$ V e, logo, $V_{AB} = -12$ V - (+12 V) = -24 V.

Várias Fontes de Tensão Contínua em um Mesmo Circuito

Você precisa ainda saber o que ocorre quando colocamos mais de uma fonte de tensão contínua num mesmo circuito. Existem duas maneiras de conectarmos elementos de um circuito: ligação em série e ligação em paralelo. Na Figura 4.6 ilustramos a diferença entre dois circuitos ligados em série e em paralelo.

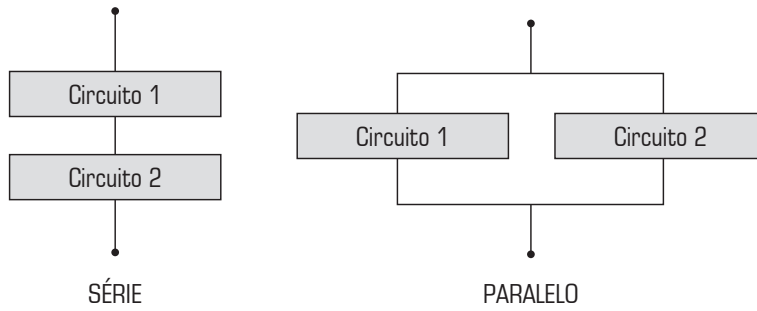


Figura 4.6: Circuito em série vs. circuito paralelo.

Ligação de Fontes de Tensão Contínua em Série

As tensões das fontes de alimentação quando são conectadas em série são somadas. Assim, se você ligar três pilhas de 1,5 V em série, terá uma fonte de alimentação de 4,5 V. Mas, para isso, o polo negativo de uma pilha deverá ser conectado ao polo positivo da próxima pilha na série. Caso você ligue uma pilha "invertida", isto é, seu polo negativo ligado ao polo negativo da próxima pilha (e não ao polo positivo), então você deve considerar a tensão dessa pilha como "negativa". Por exemplo, se você ligar três pilhas em série, porém com uma "invertida", a tensão total será 1,5 V + 1,5 V - 1,5 V = 1,5 V. Mostramos essas duas situações na Figura 4.7.

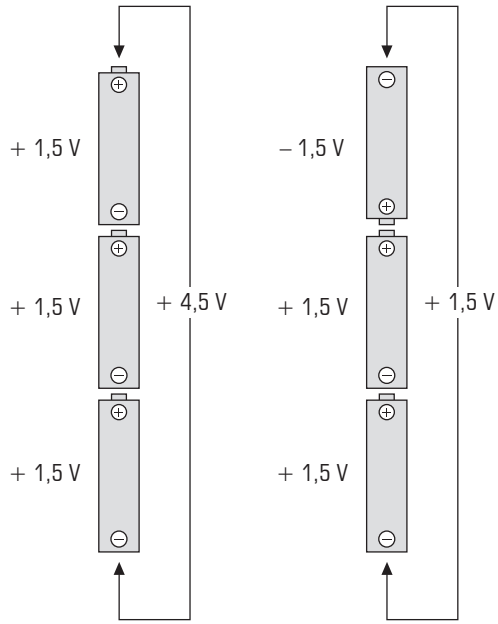


Figura 4.7: Ligação de fontes de alimentação em série.

Ligação de Fontes de Tensão Contínua em Paralelo

No caso de ligação em paralelo de duas pilhas, como mostra a Figura 4.8, a tensão na saída será de 1,5 V, não havendo nem soma nem subtração. A vantagem, porém, é que haverá uma divisão na corrente elétrica, ou seja, no fluxo de elétrons que sai das pilhas. Em nosso exemplo, cada

pilha será responsável pela metade da corrente elétrica cada. Com isso, a capacidade de corrente é dobrada. Explicando de uma maneira mais simples, se você ligar duas pilhas pequenas AA em paralelo, isso fará com que cada pilha demore o dobro do tempo normal para acabar, já que você duplicou a capacidade de fornecimento de corrente da fonte de alimentação.

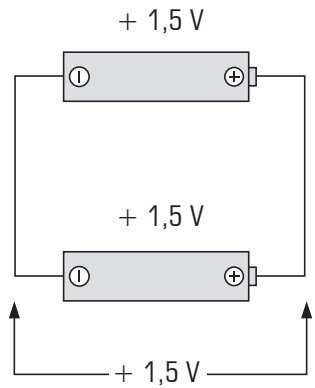


Figura 4.8: Ligação de fontes de alimentação em paralelo.

No caso de uma das pilhas ser invertida, em teoria o valor de uma pilha "anularia" o valor da outra, ou seja, a diferença de potencial seria zero. Só que, na prática, você não pode fazer essa ligação, pois você colocará as pilhas em curto-circuito ("uma alimentando a outra"), o que acarretaria uma desgraça qualquer que explicaremos melhor no Capítulo 6.

Lei das Malhas

A Lei das Malhas, também conhecida *Lei das Tensões* ou *Segunda Lei de Kirchhoff*, diz que a soma das diferenças de potencial de uma malha de um circuito é sempre nula. Uma malha é um circuito elétrico fechado. No circuito da Figura 4.9 não há divisão de corrente e, portanto, o circuito possui apenas uma malha. Já no circuito da Figura 4.10, a corrente é dividida em três e, com isso, o circuito possui três malhas. Já no circuito da Figura 4.11, a corrente é dividida em duas e, com isso, o circuito possui duas malhas.

Para entender isso, considere o circuito da Figura 4.9. Se percorrermos este circuito em sentido horário a partir de R1, temos que as somas das quedas de tensão serão $V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} - V_{CC} = 0$. O valor da fonte de alimentação é computado como valor negativo porque percorrendo este circuito no sentido horário chegaremos ao polo negativo da fonte de alimentação. Ou seja, $V_{CC} = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3}$.

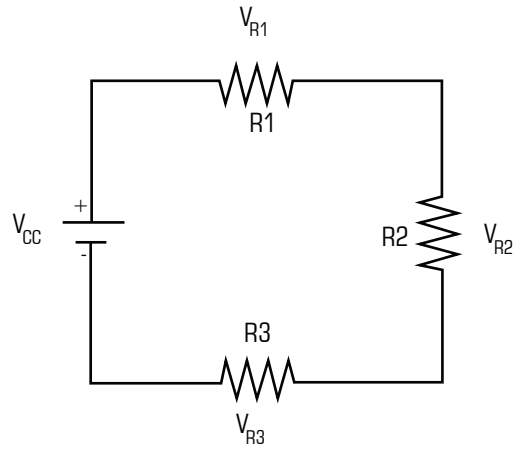


Figura 4.9: Estudo da Lei das Malhas (ver texto).

Já no circuito da Figura 4.10, temos de analisar cada uma das malhas individualmente. A primeira malha é formada por R1. Dessa forma, $V_{R1} - V_{CC} = 0$, ou seja, $V_{CC} = V_{R1}$. Analisando a segunda malha temos que $V_{R2} - V_{CC} = 0$, ou seja, $V_{CC} = V_{R2}$. E analisando a terceira malha temos que $V_{R3} - V_{CC} = 0$, ou seja, $V_{CC} = V_{R3}$. Chegamos à conclusão de que, neste circuito, $V_{CC} = V_{R1} = V_{R2} = V_{R3}$.

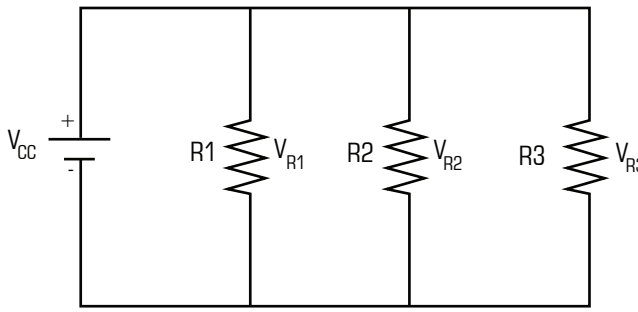


Figura 4.10: Estudo da Lei das Malhas (ver texto).

Vamos analisar um terceiro circuito, onde temos componentes tanto em série quanto em paralelo (ver Figura 4.11). Neste caso, temos duas malhas. A primeira malha é formada por R1 e R2. A segunda malha é formada por R1 e R3. Analisando a primeira malha, temos que $V_{R1} + V_{R2} - V_{CC}$

= 0, ou seja, $V_{CC} = V_{R1} + V_{R2}$. Analisando a segunda malha, temos que $V_{R1} + V_{R3} - V_{CC} = 0$, ou seja, $V_{CC} = V_{R1} + V_{R3}$. Com isso temos que $V_{R2} = V_{R3}$. Veja:

Se $V_{CC} = V_{R1} + V_{R2}$ e $V_{CC} = V_{R1} + V_{R3}$, então:

$V_{R1} + V_{R2} = V_{R1} + V_{R3}$

$V_{R1} - V_{R1} + V_{R2} = V_{R3}$

$V_{R2} = V_{R3}$

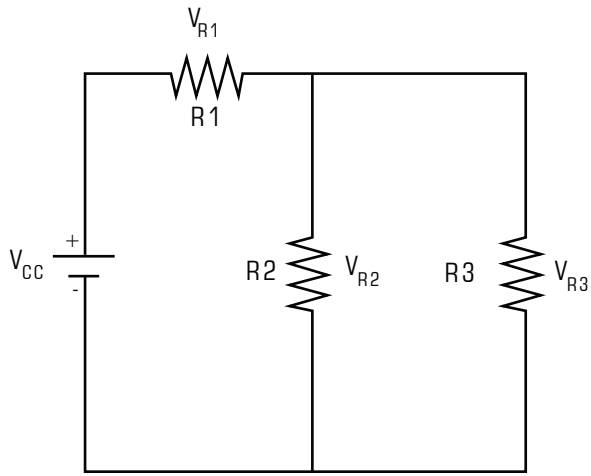


Figura 4.11: Estudo da Lei das Malhas (ver texto).

As implicações práticas diretas da Segunda Lei de Kirschhoff são as seguintes:

1. A queda de tensão de qualquer malha de um circuito é sempre igual à tensão da fonte de alimentação do circuito.
2. Em um circuito com componentes ligados em série, a tensão da fonte é dividida entre eles, ao passo que a corrente que circula nos componentes é a mesma (ver Figura 4.9). É importante entender que essa divisão não é necessariamente igual, isto é, não necessariamente $V_{R1} = V_{R2} = V_{R3}$. Isso vai depender do valor das resistências de R1, R2 e R3, como estudaremos a seguir no tópico *Lei de Ohm*.
3. Em um circuito com componentes ligados em paralelo, a corrente que circula é dividida, ao passo que a tensão sobre os componentes é a mesma.

Lei de Ohm

A tensão elétrica possui uma estreita relação com as outras duas grandezas elétricas básicas, a *corrente elétrica* (o fluxo de elétrons se deslocando de onde é negativo para onde é positivo, normalmente representada pela letra I) e a *resistência elétrica* (a oposição à passagem da corrente elétrica oferecida pelos condutores, normalmente representada pela letra R).

Essa relação é definida pela Lei de Ohm, que diz que a intensidade da corrente elétrica que circula por condutor é diretamente proporcional à tensão aplicada sobre ele, e inversamente proporcional à resistência do condutor.

A Lei de Ohm pode ser convertida, portanto, na seguinte fórmula matemática:

$$I = \frac{V}{R} \tag{4.2}$$

De onde podemos concluir que:

$$V = R \cdot I \tag{4.3}$$

$$R = \frac{V}{I} \tag{4.4}$$

Neste livro estaremos usando a letra V para representar tensão. Alguns outros livros utilizam a letra E ou U em vez de V, significando força eletromotriz.

Tensão Contínua vs. Corrente Contínua

Antes de passarmos para o próximo capítulo, onde estudaremos a tensão elétrica alternada, é importante que você saiba de um erro comum que as pessoas cometem quando estão se referindo à eletricidade. Muita gente se refere, erroneamente, à tensão contínua como "corrente contínua", como, por exemplo, na frase "uma pilha fornece uma corrente de 1,5 V". Uma pilha

fornece uma tensão de 1,5 V e não uma corrente. Outro erro comum é o uso do termo *voltagem*, que deve ser evitado.

Como a corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão elétrica (ver Lei de Ohm), é válido dizer que, se a tensão elétrica possui um valor fixo, isto é, ela é contínua, e caso o valor da resistência não varie (seja fixo), então o valor da corrente elétrica será igualmente contínuo, gerando a expressão *corrente contínua*.

Circuitos que operam com corrente contínua são também chamados CC ou DC (Direct Current), e fontes de tensão contínua normalmente são rotuladas como V_{CC} ou V_{DC}.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a tensão elétrica total de duas baterias de 9 V conectadas em paralelo?
2. Qual é a tensão elétrica total de duas baterias de 9 V conectadas em série?
3. O que acontece se você pegar uma fonte de alimentação com várias saídas e usar a saída rotulada como +12 V como sendo o polo positivo para alimentar um circuito e a saída rotulada como +5 V como sendo o polo negativo para alimentar o mesmo circuito?
4. O que acontece se você pegar uma fonte de alimentação com várias saídas e usar a saída rotulada como -12 V como sendo o polo positivo para alimentar um circuito e a saída rotulada como 5 V como sendo o polo negativo para alimentar o mesmo circuito?
5. Em dois componentes conectados em série, a _____ (tensão/corrente) será a mesma nos dois componentes.
6. Em dois componentes conectados em paralelo, a _____ (tensão/corrente) será a mesma nos dois componentes.

Capítulo 5
Tensão Elétrica Alternada

Introdução

Vimos que a tensão elétrica contínua possui esse nome porque a tensão elétrica não varia ao longo do tempo. Já na tensão elétrica alternada, como o seu nome já diz, o valor da tensão varia ao longo do tempo. O melhor exemplo de tensão alternada é a tomada encontrada em nossas casas: a tensão da tomada é uma forma de onda senoidal, que muda suavemente de polaridade várias vezes por segundo, como mostra a Figura 5.1.

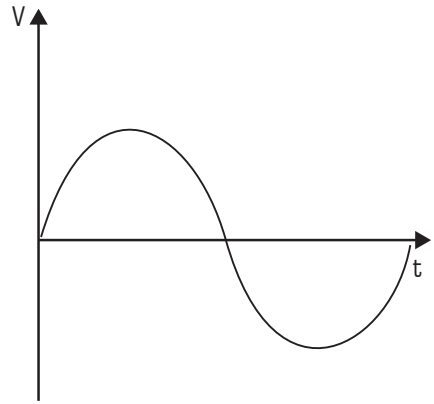


Figura 5.1: Exemplo de tensão alternada.

A forma de onda apresentada na Figura 5.1 possui dois semiciclos, um positivo e um negativo, e ela é perfeitamente simétrica, significando que o período do semiciclo positivo, isto é, o tempo em que a forma de onda fica na área positiva do gráfico, é o mesmo do semiciclo negativo.

Fontes de tensão alternada – como a tomada elétrica encontrada em nossas casas – possuem dois polos: um chamado *fase* e outro chamado *neutro*. O neutro é o "zero volt", o polo usado como referencial. Já a fase tem um potencial elétrico que varia ao longo do tempo. Ao contrário do que ocorre em uma pilha ou em uma fonte de tensão contínua qualquer, não existem os polos "positivo" e "negativo": a fase é o polo negativo e o polo positivo, dependendo do momento.

Tensão de Pico

Só para ficar mais claro: em uma rede elétrica de 127 V, por exemplo, o valor de pico da tensão é de aproximadamente 180 V (o valor de pico, muitas vezes abreviado Vp, é o valor máximo que a senoide atinge). Daqui a pouco explicaremos por que o valor máximo é 180 V e não 127 V; por enquanto apenas aceite isso como verdade. Isso significa que a tensão na tomada vai subindo até atingir o seu valor máximo (+180 V), e em seguida vai descendo até chegar a zero volt e depois vai descendo até atingir o seu valor mínimo (-180 V), subindo até zero volt e começando um novo ciclo. Ou seja, um ciclo da tensão alternada encontrada na tomada é formado por dois semiciclos: um positivo (que atinge até +180 V) e outro negativo (que atinge até -180 V). É como se o semiciclo positivo fosse uma pilha ligada "corretamente" e o semiciclo negativo fosse uma pilha ligada "invertida", só para você fazer uma correlação do que estamos falando agora com o que falamos no capítulo passado sobre tensões negativas.

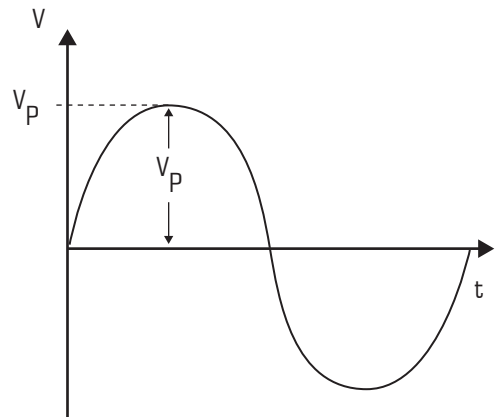


Figura 5.2: Tensão de pico (Vp).

Tensão de Pico-a-Pico

Nesse mesmo caso, a tensão de pico-a-pico (normalmente abreviada por Vpp) será de 360 V (180 V + 180 V); a tensão de pico-a-pico é a "distância" entre o pico máximo e o pico mínimo: como temos 180 volts para cima e 180 volts para baixo, a distância entre o ponto máximo e o mínimo é de 360 volts, ver Figura 5.3. Mas é importante notar que, apesar de a distância máxima entre o pico máximo positivo e o pico mínimo negativo (Vpp) ser de 360 V, a diferença de potencial máximo que temos é de 180 V (distância entre qualquer um dos picos e o eixo y).

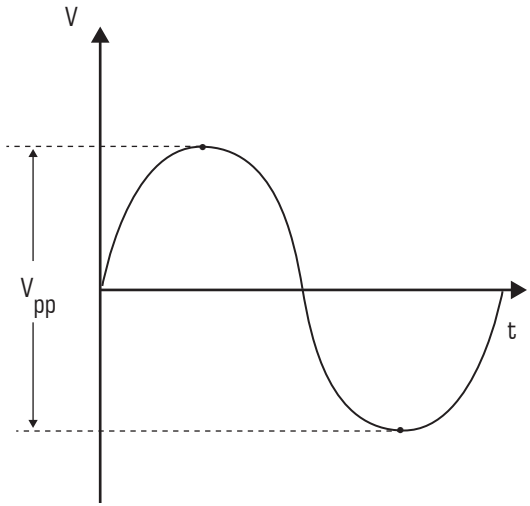


Figura 5.3: Tensão de pico-a-pico (Vpp).

Tensão Eficaz (RMS)

Como a tensão alternada não possui um valor "fixo" (ela varia ao longo do tempo), o mais importante a saber sobre o valor de uma tensão alternada não são os seus valores de pico ou pico-a-pico, mas sim o seu *valor eficaz* ou RMS (Root Medium Square, raiz média quadrada). Esse valor é o quanto a tensão alternada valeria se fosse contínua. Em termos de cálculo, é a área da forma de onda dividida pela duração do ciclo (ou seja, a sua integral – se você nunca estudou cálculo, não se preocupe com essa palavra cabeluda). Em bom português: é o quanto a tensão alternada valeria se ela fosse "espremida" para ficar reta, como mostra a Figura 5.4.

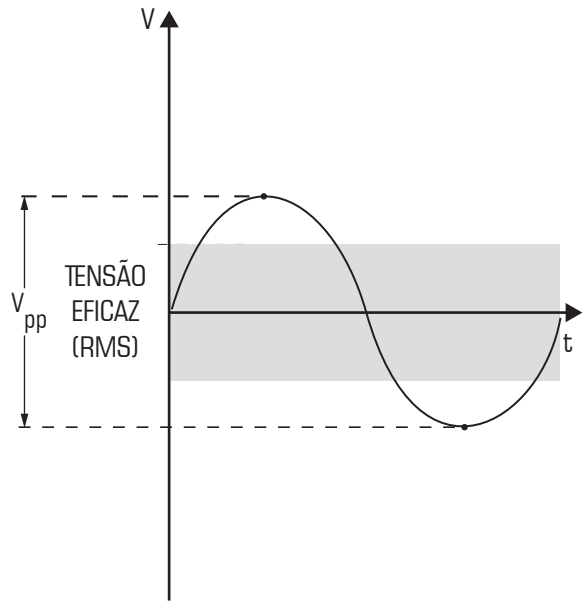


Figura 5.4: Valor da tensão eficaz (RMS).

Os valores nominais de tensão da rede elétrica (110 V, 127 V, 220 V, 230 V, 240 V etc.) são os valores eficazes (RMS) da rede. Por isso que dissemos que em uma rede de 127 V a tensão de pico é de 180 V: 127 V é a tensão eficaz da rede, ou seja, o quanto a tensão valeria se fosse contínua.

Em uma tensão senoidal como todas as que estamos vendo até agora, o valor da tensão eficaz (RMS) é igual a 70,7% ($1/\sqrt{2}$) do valor da tensão de pico. A fórmula é a seguinte:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \tag{5.1}$$

$$V_p = V_{RMS}.\sqrt{2} \tag{5.2}$$

Para formas de onda quadrada, a tensão eficaz (RMS) é igual ao valor da tensão de pico da onda, enquanto que em ondas triangulares ou dente de serra, a tensão eficaz é $1/\sqrt{3}$ da tensão de pico.

Tensão Média

Outra informação que pode ser útil em alguns casos é saber a *tensão média* da tensão alternada. Em formas de onda simétricas (isto é, onde o semiciclo positivo e o semiciclo negativo possuem a mesma duração), a tensão média é a soma da tensão de pico positivo com a tensão de pico negativo e dividindo-se o resultado por dois. No caso da tensão alternada da rede elétrica, a tensão média é de zero volt, porque os semiciclos são de mesmo tamanho e o eixo central da senoide é em zero volt.

Entretanto, há casos onde a tensão alternada possui semiciclos assimétricos ou então a tensão alternada está flutuando sobre uma tensão contínua (essa flutuação é também chamada "*offset DC*"). Para ficar mais claro, considere a Figura 5.5. Qual é o valor da tensão de pico-a-pico? Qual é a tensão média da tensão alternada? Qual é o valor da tensão contínua sobre a qual a tensão alternada está flutuando?

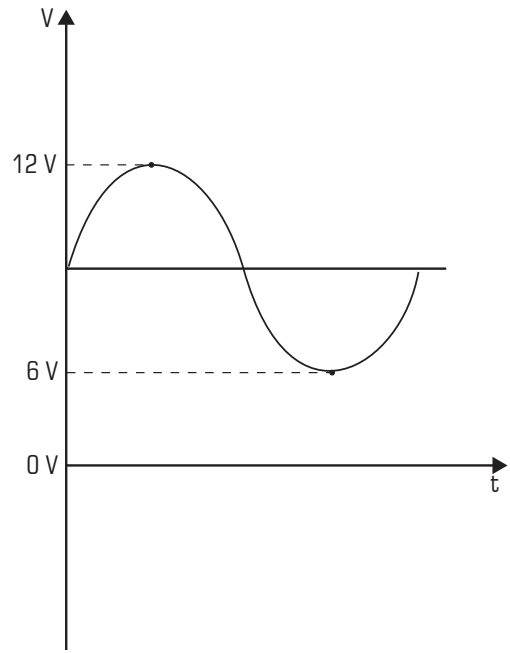


Figura 5.5: Exemplo de uma tensão alternada flutuando sobre uma tensão contínua.

A tensão de pico máxima é de +12 V e a tensão de pico mínima é de +6 V. Logo, a tensão de pico-a-pico é de +6 V (12 - 6). Aqui a regra é parecida com a soma de fontes de alimentação contínua. Quando possuem polaridades diferentes, soma-se; quando possuem polaridades iguais, subtrai-se.

A tensão média dessa forma de onda é de 9 V [(12 V + 6 V) / 2]. Isso significa que a tensão alternada está flutuando sobre uma tensão contínua de +9 V. Ou seja, o "offset DC" dessa forma de onda é de +9 V.

Nós explicaremos o que ocorre com a tensão média quando a forma de onda não é simétrica mais adiante, no tópico *Forma de Onda Retangular*.

Frequência

Uma das características mais importantes que devemos saber sobre uma tensão alternada é a sua *frequência*. Frequência é a quantidade de ciclos por segundo que a tensão varia, medida em uma unidade chamada hertz e abreviada como Hz. Uma tensão com uma frequência de um hertz significa que a tensão possui um ciclo por segundo. Se a tensão apresentada na Figura 5.1 tivesse um hertz, significa que o ciclo mostrado na figura duraria um segundo. Note que estamos falando do ciclo completo, isto é, incluindo o semiciclo positivo e o semiciclo negativo. Neste mesmo exemplo, cada semiciclo duraria exatamente a metade do ciclo, ou seja, meio segundo (0,5 s ou 500 ms).

Na rede elétrica brasileira, a tensão alternada possui uma frequência de 60 Hz. Isso significa que, em um segundo, há 60 formas de onda como a da Figura 5.1. Alguns países (especialmente os europeus) utilizam uma frequência de 50 Hz em vez de 60 Hz em suas tomadas elétricas.

Se você parar para pensar, isso também significa que uma lâmpada incandescente comum ("lâmpada amarela" ou "lâmpada quente") teoricamente pisca 120 vezes por segundo (note que, em um ciclo, a tensão vai a zero volt duas vezes: uma no início do semiciclo positivo e outra no início do semiciclo negativo). Então como é que não vemos a lâmpada piscar? O que ocorre é que o tempo em que a lâmpada fica sem receber tensão elétrica é muito baixo (1/120 segundo ou 8,3 ms). O tempo que a lâmpada incandescente demora para "esfriar" e você a ver apagada é maior do que 8,3 ms, fazendo com que a lâmpada, na verdade, continue acesa, mesmo sua tensão elétrica sendo cortada a cada 8,3 ms. Uma lâmpada fluorescente efetivamente pisca nessa frequência mas mesmo assim não a vemos piscando pois nossos olhos não conseguem acompanhar variações de luz dessa velocidade.

O tempo de duração de cada ciclo de uma tensão alternada é chamado período, que pode ser facilmente calculado pela fórmula:

$$T = \frac{1}{f} \tag{5.3}$$

Na Figura 5.6 você confere o período de uma tensão alternada.

Se a forma de onda for simétrica, isto é, os semiciclos positivos e negativos tiverem exatamente a mesma duração, então a duração (período) de cada semiciclo pode ser facilmente calculada dividindo-se o período por dois.

Assim, na rede elétrica de 60 Hz, cada ciclo dura 16,6 ms (1/60), e cada semiciclo, 8,3 ms (16,6 ms/2).

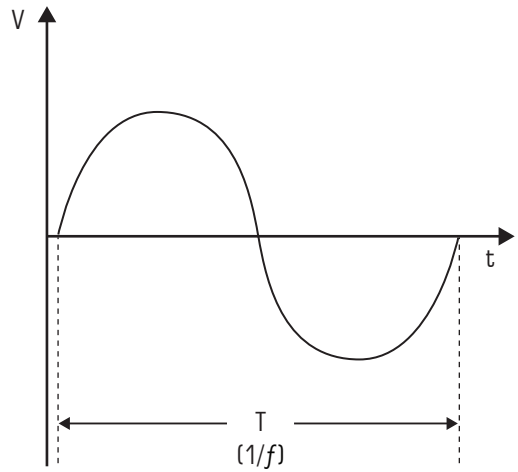


Figura 5.6: Período.

Formas de Onda

Vimos até agora somente a tensão alternada em sua forma senoidal. Você poderá encontrar outros formatos de tensão alternada, como quadrada, retangular, triangular e "dente de serra".

Forma de Onda Quadrada

A forma de onda quadrada é mostrada na Figura 5.7. Nela a tensão alterna entre dois valores "fixos" e a duração de cada semiciclo é a mesma, ou seja, ela é uma forma de onda simétrica. Enquanto que na forma de onda senoidal da Figura 5.1 o valor da tensão aumenta "aos poucos" até chegar ao seu pico máximo para então diminuir, também "aos poucos", na forma de onda quadrada a tensão sobe e desce abruptamente, e fica em um valor contínuo por algum tempo.

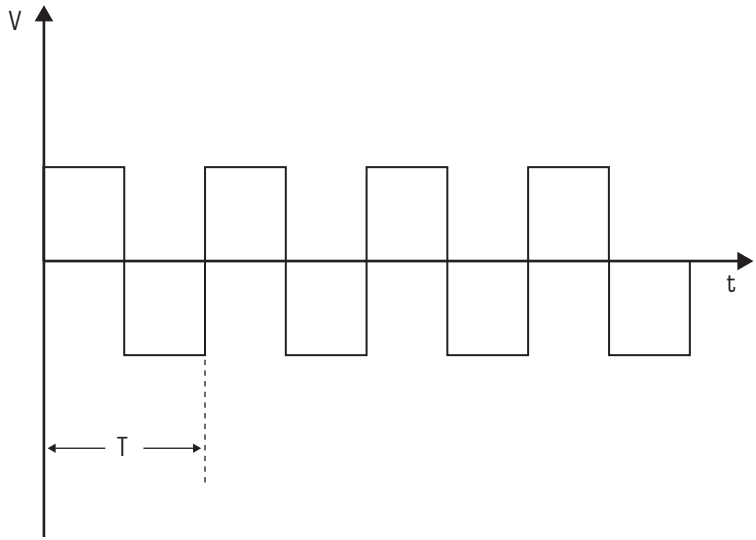


Figura 5.7: Forma de onda quadrada.

Forma de Onda Retangular

Vários circuitos eletrônicos necessitam de formas de onda quadradas assimétricas, isto é, a divisão entre os dois semiciclos não sendo 50%-50%. O ciclo de carga, expresso em uma porcentagem, indica a duração do semiciclo positivo em relação ao semiciclo negativo. Uma forma de onda simétrica tem, portanto, um ciclo de carga de 50%, significando que o semiciclo positivo dura 50% (ou seja, metade) do tempo e, portanto, o semiciclo negativo durará a outra metade (50%). Uma forma de onda com um ciclo de carga de 30% significa que o semiciclo positivo terá duração de 30% do tempo e o semiciclo negativo terá duração de 70% do tempo. Veja o exemplo da Figura 5.8.

No caso de formas de onda retangulares, precisamos saber exatamente qual é o ciclo de carga para podermos calcular a duração de cada semiciclo. No exemplo da Figura 5.8, a duração do semiciclo positivo será 30% do período e, consequentemente, a duração do semiciclo negativo será 70% do período. Note que neste exemplo a forma de onda permanece em zero volt durante o semiciclo negativo, mas este semiciclo continua sendo chamado "negativo" (neste caso a tensão pode ser considerada não como alternada, mas como contínua pulsante). Se supormos um período de 4 ms para a forma de onda da Figura 5.8, temos que o semiciclo positivo durará 1,2 ms e o semiciclo negativo, 2,8 ms.

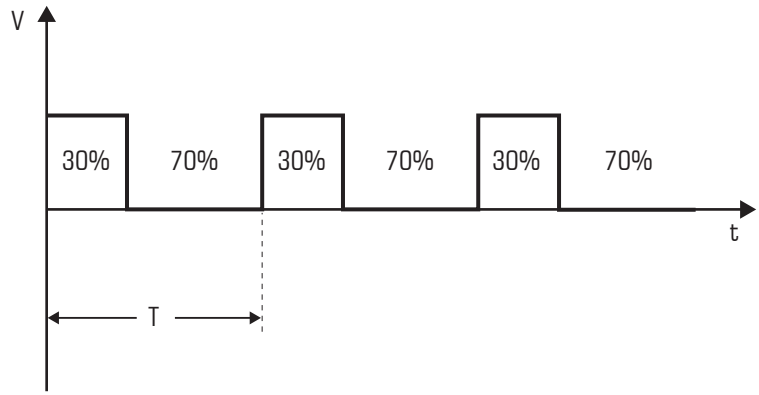


Figura 5.8: Forma de onda quadrada com ciclo de carga de 30%.

A "beleza" da forma de onda retangular está no fato de que você pode, alterando o ciclo de carga, alterar a tensão média da forma de onda. O valor da tensão média é simplesmente o valor da tensão de pico multiplicada pelo ciclo de carga. Portanto, se a tensão de pico na Figura 5.8 for de 12 V, então a tensão média será de 3,6 V. Determinados componentes alimentados por esta forma de onda terão o mesmo efeito de estarem sendo alimentados por uma fonte de alimentação contínua de 3,6 V.

$$\text{Tensão média} = V_p \cdot \text{ciclo de carga} \tag{5.4}$$

A técnica de se alterar a tensão média de uma forma de onda retangular alterando-se o ciclo de carga da forma de onda é chamada *modulação por largura de pulso* ou PWM (Pulse Width Modulation) e é largamente empregada para alterar o brilho de lâmpadas e a velocidade de motores. Com o mesmo circuito usado para gerar a forma de onda da Figura 5.8 poderíamos, por exemplo, alterar o ciclo de carga para 40%, quando então teríamos o equivalente a 40% da tensão máxima, aumentando a velocidade de um motor ou o brilho de uma lâmpada sendo conectada a esta forma de onda.

Forma de Onda Triangular

A forma de onda triangular, como o nome diz, parece-se com um triângulo (ver Figura 5.9). Nela a tensão cresce em uma linha reta até o seu valor máximo e decresce na mesma velocidade. Sendo simétrica, a duração de cada semiciclo será exatamente a metade do período.

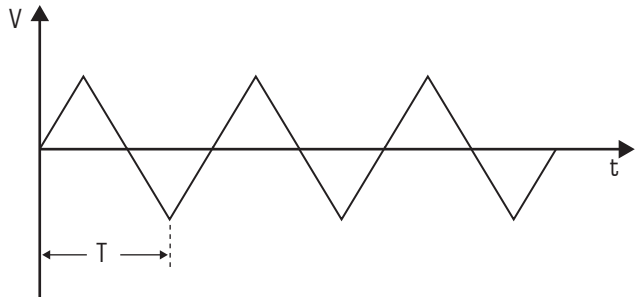


Figura 5.9: Forma de onda triangular.

Forma de Onda "Dente de Serra"

A forma de onda "dente de serra" é uma forma de onda triangular assimétrica. Esta forma de onda pode ter dois aspectos, rampa positiva, quando ela cresce da mesma forma que uma forma de onda triangular, mas cai a zero volt tão logo atinja seu pico, ou rampa negativa, onde ela sobe imediatamente de zero volt até seu pico máximo para então decrescer tal como uma forma de onda triangular. Ver Figura 5.10.

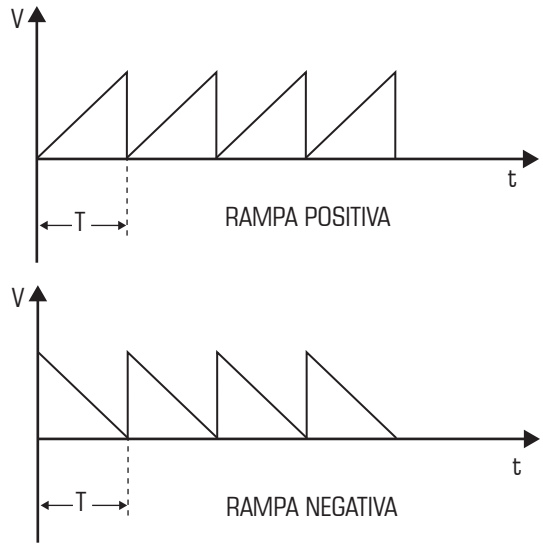


Figura 5.10: Formas de onda "dente de serra".

Defasagem

A posição de uma forma de onda senoidal também pode ser expressa em graus ou radianos. Um período completo representa 360º ou 2π radianos (ver Figura 5.11 para entender).

Quando comparamos duas formas de onda senoidais distintas de mesma frequência e dizemos que elas estão defasadas em 180º, isto significa que quando a primeira está na posição 0º, a segunda estará na posição 180º, quando a primeira estiver na posição 90º, a segunda estará na posição 270º, e quando a primeira estiver na posição 180º, a segunda estará na posição 360º. Da mesma forma, quando dizemos que, duas formas de onda senoidais distintas de mesma frequência estão defasadas em 90º, isto significa que quando a primeira está na posição 0º, a segunda está na posição 90º, quando a primeira está na posição 90º, a segunda está na posição 180º e assim por diante.

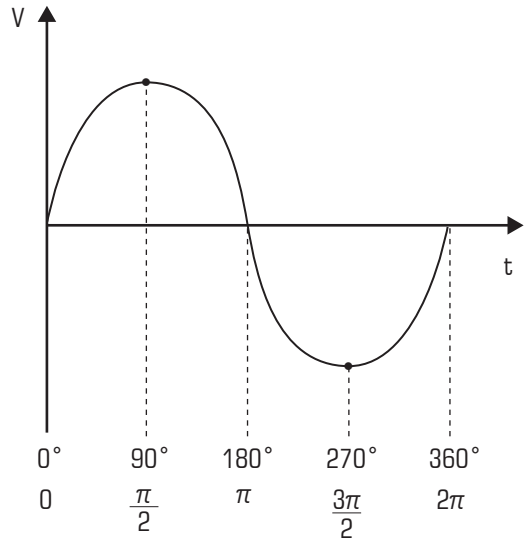


Figura 5.11: Ângulos de uma forma de onda senoidal.

Você deve estar se perguntando de onde vêm esses ângulos. Muito simples, do processo de geração da tensão alternada usada na rede elétrica. Uma turbina em uma usina elétrica gira na mesma velocidade da frequência da tensão que queremos produzir. Em uma rede elétrica de 60 Hz, a turbina gira 60 vezes por segundo. Cada período da tensão alternada na saída da turbina equivale, portanto, a uma rotação completa efetuada pela turbina ao redor de seu eixo – ou seja, um período equivale a uma rotação de 360º da turbina. O ângulo da forma de onda

(Figura 5.11) é justamente a posição das pás da turbina em relação ao eixo da turbina em um dado momento.

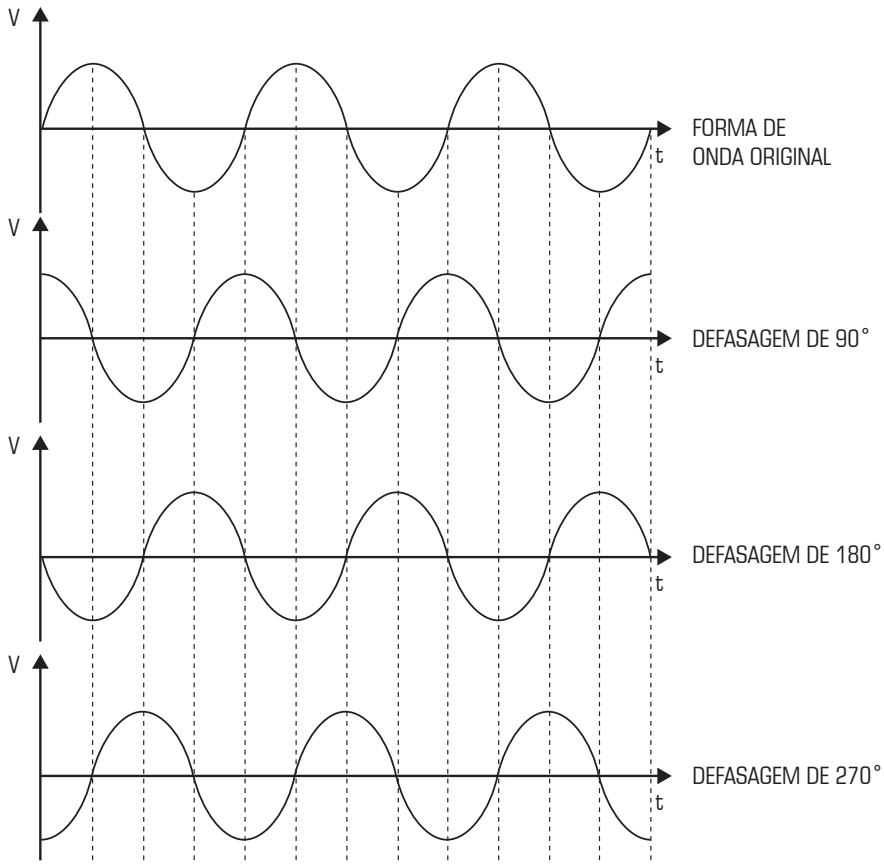


Figura 5.12: Defasagem.

Ligação de Várias Fontes de Tensão Alternada em um Mesmo Circuito

No caso da ligação de mais de uma fonte de tensão alternada ao mesmo tempo, haverá um aumento ou redução na tensão de acordo com a *defasagem* que existir entre elas. Para ficar

mais clara essa ideia, considere a seguinte experiência prática: pegamos duas fases de 127 V e ligamos cada uma delas em um dos polos de uma lâmpada. Qual será a tensão aplicada na lâmpada? Depende.

Se você ligar duas fases que estejam exatamente sincronizadas ("em fase"), não haverá diferença de potencial entre elas. Ou seja, quando uma fase está atingindo o seu valor de pico máximo, a outra também está. Assim, apesar de ambas valerem 180 V nesse momento, a diferença de potencial entre elas será de zero volt (180 V - 180 V). Entretanto, se uma das tensões estiver invertida em relação a outra, como mostra a Figura 5.13, a diferença de potencial de pico entre as duas será de 360 V (180 V + 180 V), pois, quando uma estiver em seu pico máximo, a outra estará em seu pico mínimo. Essa diferença de fase "espelho" é também conhecida como diferença de fase de 180º ou simplesmente defasagem de 180º.

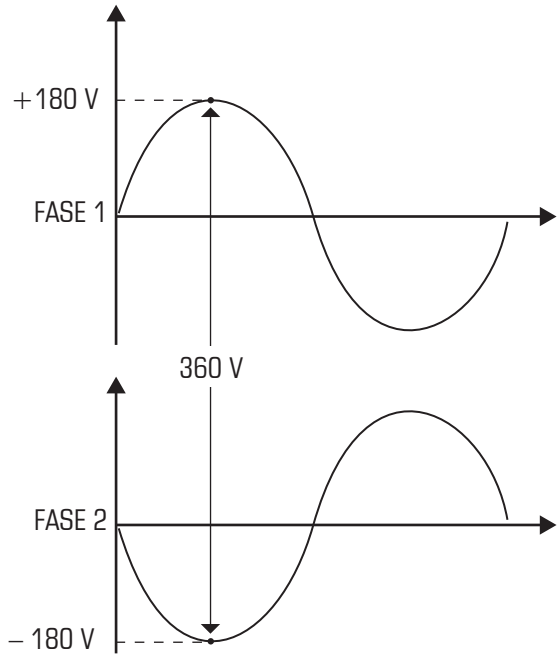


Figura 5.13: Diferença de fase de 180º entre duas fases.

Só como curiosidade, é assim que é possível "transformar" uma tomada de 127 V em uma tomada de 220 V: na tomada de 127 V, temos um fio que é fase e outro que é neutro. Em uma tomada de 220 V o neutro é substituído por uma outra fase que esteja defasada em relação à

fase original. Se ela não estiver defasada, a diferença de potencial entre os dois fios será de zero volt, como vimos anteriormente.

Nesse tipo de ligação, a defasagem entre as duas fases é de 120º: ligando em uma tomada duas fases de 127 V defasadas em 120º temos uma tensão alternada de 220 V. O cálculo para acharmos esse valor precisa de alguma trigonometria e foge ao escopo deste livro.

No sistema elétrico residencial, quando é dito que o sistema possui uma, duas ou três fases isso significa que a companhia de fornecimento de energia elétrica está disponibilizando um, dois ou três fios contendo fases defasadas entre si. Isso permite não só isolar circuitos elétricos da casa como também transformar tomadas de 127 V em 220 V caso as fases sejam de 127 V cada.

O Choque

Você já deve ter tomado choque pelo menos uma vez em sua vida. O choque elétrico ocorre quando o nosso organismo sente a passagem de corrente elétrica através de nós. Uma pilha não dá choque porque a tensão é baixa e a corrente que passa por nosso corpo quando colocamos um dedo em cada polo da pilha é muito baixa. No caso da tomada da rede elétrica, a história é bem diferente.

Como vimos, a tomada elétrica possui dois polos: fase e neutro. O neutro é um fio que não dá choque. Isso ocorre porque o neutro possui zero volt e nosso corpo, por estar ligado à terra por estarmos em contato com o chão, também. Assim, não há diferença de potencial entre nós e o neutro. Já a fase dá choque, porque, como nós temos potencial zero, haverá uma diferença de potencial entre nós e a fase, fazendo com que a corrente elétrica circule. Normalmente, se calçarmos um sapato com sola de borracha ou estivermos sobre um piso isolante, não levamos choque quando encostamos na fase. Isso ocorre porque nesse caso estaremos isolados do chão (onde existem elétrons livres) e passamos a ter o mesmo potencial da fase, não havendo diferença de potencial entre nós e a fase, fazendo com que não exista circulação de corrente elétrica e, logo, nenhum choque é sentido.

Uma corrente elétrica passando pelo nosso corpo pode causar desde apenas uma sensação de formigamento até queimaduras gravíssimas, na pele e no interior do corpo. O pior caso é quando a corrente passa pelo coração, que pode parar até mesmo com correntes de baixa intensidade. Ou seja, a gravidade de um choque elétrico depende da trajetória que a corrente elétrica seguirá pelo interior do nosso corpo.

Aterramento

Teoricamente as tomadas deveriam ter, além da fase e do neutro, mais um polo: terra. Esse polo indica zero volt absoluto, estando conectado diretamente a uma barra de ferro ou aço (frequentemente revestida de cobre) fincada ao solo, com pelo menos 2,5 m de comprimento. O solo, como comentamos, é fonte inesgotável de elétrons livres. O polo neutro, dependendo do

sistema elétrico em que esteja ligado, poderá estar "sujo", isto é, poderá haver fuga de aparelhos elétricos ligados ao sistema e, com isso, em vez de ele ter zero volt, pode passar a ter um pouco mais. O uso do terra também é importante em sistemas de 127 V "transformados" em 220 V: como os dois polos da tomada são fases defasadas entre si, é necessário um neutro ou terra para equilibrar o potencial da carcaça do equipamento.

Normalmente a carcaça metálica de qualquer equipamento elétrico ou eletrônico precisa estar ligada ao terra. Isso ocorre para que, caso a fase da tomada por algum motivo encoste na carcaça do equipamento (por exemplo, fio desencapado dentro do aparelho encostando em sua carcaça), o disjuntor da sua casa ou escritório imediatamente desarme, pois haverá um curto-circuito (ligação entre a fase e o terra). Dessa forma, o disjuntor desarmará para indicar que há um equipamento defeituoso no circuito e evitando que pessoas tomem choque.

Se, no entanto, a ligação entre a carcaça do equipamento e o terra não existir (o que, infelizmente, é a realidade na maioria das instalações elétricas no Brasil), você tomará choque caso a fase da rede elétrica encoste na carcaça do equipamento. O exemplo clássico é o da geladeira da casa de veraneio, que dá choque quando a abrimos descalços. Isso acontece porque a fase da rede elétrica está encostando na carcaça da geladeira, e a carcaça da geladeira não está aterrada. Infelizmente a solução que todo mundo dá a este problema é calçar um sapato, em vez de consertar a geladeira. Calçado você não tomará choque porque os elétrons do chão não têm mais como passar por você, já que o sapato é isolante.

Uma solução barata para acabar com esse problema da geladeira é simples: basta você inverter o plugue da tomada elétrica. Invertendo a tomada, você fará com que o fio que estava ligado na fase passe a estar ligado no neutro e vice-versa. Assim, o fio que está encostando na carcaça passará a ser o neutro e não mais a fase e você não tomará mais choque (já que o neutro tem potencial zero). É claro que essa dica não vale para sistemas elétricos de 220 V transformados a partir de duas fases de 127 V, pois nesse caso cada fio é uma fase!

A solução definitiva para esse tipo de problema nós já dissemos: aterrar a carcaça do aparelho e consertar o equipamento caso o disjuntor desarme.

Por Que a Rede Elétrica Usa Tensão Alternada?

Praticamente todos os equipamentos eletrônicos são alimentados com tensão contínua e não com tensão alternada. Rádios, aparelhos de CD, tocadores de DVD e Blu-Ray, computadores, consoles de videogame e telefones sem fio são apenas alguns equipamentos que são alimentados internamente por tensão contínua e não alternada. Quando esses aparelhos são ligados à tomada elétrica, a tensão alternada é primeiramente convertida em tensão contínua por um circuito chamado fonte de alimentação ou conversor CC/CA (AC/DC, em inglês), que estudaremos em detalhes no Capítulo 31.

Então, fica a pergunta: para que a tensão alternada existe? Por que o sistema elétrico simplesmente não distribui direto tensão contínua em vez de alternada?

Há vários motivos para a tensão elétrica de nossas casas ser alternada e não contínua. O primeiro motivo é a origem da própria tensão alternada. A eletricidade é gerada em usinas geradoras de eletricidade. Nessas usinas, há uma turbina, que pode ser movida por água (usinas hidrelétricas) ou por vapor (usinas termelétricas e nucleares). Girando-se a turbina, esta faz girar um gerador elétrico, que gera eletricidade (no Capítulo 10 veremos como isso é possível), e, na saída do gerador, a tensão elétrica obtida é alternada! Ou seja, para transmitir-se a eletricidade em forma de tensão contínua da usina até a sua casa, primeiro ela precisaria ser transformada em contínua.

Mas o motivo mais importante pelo qual eletricidade é gerada e transmitida de forma alternada: transformadores só funcionam em tensão alternada. Transformadores são componentes capazes de aumentar ou diminuir uma tensão elétrica (explicaremos o funcionamento dos transformadores no Capítulo 26), e equipamentos eletrônicos em geral não usam exatamente a mesma tensão fornecida pela rede elétrica. Um aparelho que funcione com 12 V contínuos para ser alimentado com a tensão da tomada (127 V alternados) precisará baixar a tensão da rede elétrica para 12 V, além de convertê-la de alternada para contínua. Outros aparelhos – e o caso mais conhecido é o da televisão – necessitam de tensões elétricas muito maiores para operarem (o tubo de imagens de um televisor é alimentado com 30.000 volts e mesmo televisores de cristal líquido necessitam de uma tensão entre 500 V e 1.000 V para alimentar a lâmpada existente atrás da tela).

A tensão gerada pelas usinas é da ordem de dezenas de milhares de volts, e a transmissão das usinas até as grandes cidades é feita com tensão ainda maior, em alguns casos chegando a 1 milhão de volts. Usa-se transformadores para baixar essa altíssima tensão no valor da tensão usada na rede elétrica de sua cidade. Se a tensão fosse transmitida de forma contínua seria bastante complicado baixar o seu valor, pois transformadores só funcionam com tensão alternada.

Tensão Alternada vs. Corrente Alternada

Como falamos anteriormente, muitas pessoas cometem o erro de chamar tensão erroneamente de corrente, como, por exemplo, na frase “uma tomada fornece uma corrente de 127 V”. Uma tomada fornece uma tensão de 127 V eficazes e não uma corrente. Outro erro comum é o uso do termo voltagem, que deve ser evitado, como dissemos anteriormente.

Como em um mesmo componente a corrente elétrica é diretamente proporcional à tensão elétrica, é válido dizer que, se a tensão elétrica possui um valor variável, isto é, ela é alternada, e caso o valor da resistência não varie (seja fixo), então o valor da corrente elétrica será igualmente alternado, gerando a expressão corrente alternada.

Circuitos que operam com corrente alternada são também chamados CA ou AC (do inglês Alternating Current), e fontes de tensão alternada normalmente são rotuladas como V_{CA} ou V_{AC}.

Simbologia

O símbolo para uma fonte de tensão alternada é mostrado na Figura 5.14. O símbolo da senoide pode ser substituído de acordo com a forma de onda da tensão (quadrada, triangular etc.). Em diagramas de circuitos eletrônicos, em geral a tensão alternada que queremos indicar é a rede elétrica. A rede elétrica pode ser representada com um símbolo de tomada, como mostramos na mesma figura.

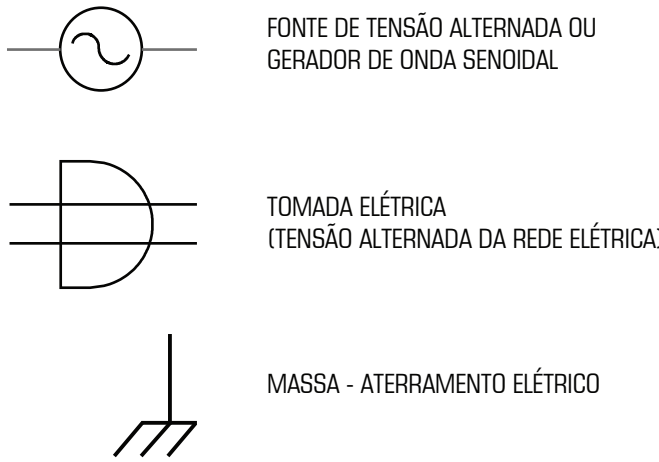


Figura 5.14: Símbolos de tensão alternada.

Lei de Ohm

As equações derivadas da Lei de Ohm (4.2, 4.3 e 4.4) também podem ser aplicadas sem qualquer problema em sistemas de tensão alternada, mas o valor da tensão deverá ser dado em seu valor eficaz (RMS), e não em seu valor de pico.

Um detalhe importante é que normalmente as letras V e I (que representam, respectivamente, tensão e corrente) quando grafadas em maiúsculas representam valores obtidos em circuitos de corrente contínua, enquanto que quando grafadas em minúsculas representam valores obtidos em circuitos de corrente alternada.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a tensão de pico de uma rede elétrica de 220 V?
2. Qual é a tensão eficaz de uma forma de onda senoidal de 12 Vpp?
3. Qual é o período de uma forma de onda alternada de 30 kHz (30.000 Hz)?
4. Qual é a frequência de uma forma de onda alternada com ciclo de 100 μs (0,0001 s)?
5. Qual é a duração um semiciclo de uma forma de onda senoidal de 1 kHz (1.000 Hz)?
6. Qual é a frequência de uma forma de onda senoidal onde cada semiciclo dura 5 ms (0,005 s)?
7. Qual é a tensão média de uma forma de onda retangular com ciclo de carga de 70% cuja tensão de pico é de 24 V?
8. Qual é o "offset DC" (ou seja, tensão média) de uma forma de onda senoidal com tensão de pico-a-pico de 12 V e tensão de pico máxima de 36 V?

Capítulo 6
Corrente Elétrica

Introdução

Corrente elétrica é um movimento ordenado de cargas elétricas. Em condutores sólidos, a corrente elétrica é composta por movimento de elétrons, apenas. A intensidade da corrente elétrica é medida através de uma unidade chamada *ampère* (A). Popularmente muita gente chama corrente elétrica de *amperagem*. Evite usar esse termo, pois, além de ser feio, normalmente demonstra que você não tem o conhecimento técnico sobre o assunto.

Representação: Sentido Eletrônico e Sentido Convencional

Antes de prosseguirmos com o assunto você deve entender algo importantíssimo em relação à representação da corrente elétrica. O fluxo de elétrons parte de um ponto com excesso de elétrons para um ponto com falta de elétrons. Em um circuito alimentado com uma tensão contínua, isso significa que o fluxo de elétrons, isto é, a corrente elétrica, sai do polo negativo da fonte, passa pelo circuito e atinge a fonte novamente através do seu polo positivo. Estudamos que o papel de uma fonte de tensão contínua é justamente ser uma "bomba", empurrando elétrons através de seu polo negativo e puxando eles de volta, depois de terem passado pelo circuito que está sendo alimentado, através de seu polo positivo.

Acontece que esse conhecimento nós só temos hoje em dia. Antigamente não se sabia comprovadamente da existência de elétrons e o sentido correto da corrente elétrica. Com isso, antigamente foi estipulado que a corrente elétrica saía do polo positivo e entrava no polo negativo,

de forma contrária ao que ocorre na realidade. O problema é que todas as explicações que já existiam sobre eletricidade – especialmente em livros – assumiam que a corrente elétrica saía do polo positivo, e não do polo negativo.

Dessa forma, é muito importante você saber que há duas formas de representar o sentido da corrente elétrica: *sentido eletrônico* (ou seja, dos elétrons) e *sentido convencional* (ou seja, definido por uma convenção). Na corrente elétrica representada no sentido eletrônico, ela sai do polo negativo e entra no polo positivo. Já uma corrente elétrica sendo representada no sentido convencional sai do polo positivo e entra no polo negativo (de forma contrária ao que ocorre na realidade). A Figura 6.1 mostra a diferença de representação.

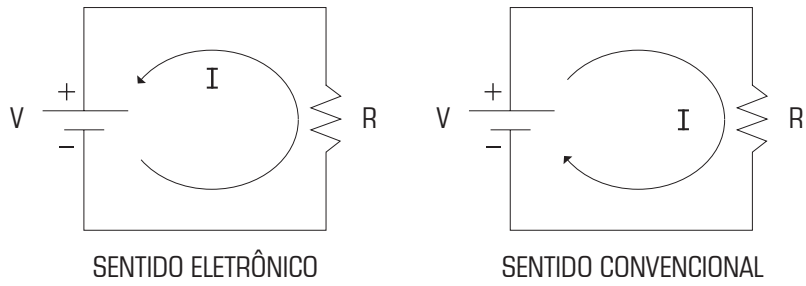


Figura 6.1: Sentido eletrônico e sentido convencional da corrente elétrica.

Sentido eletrônico e sentido convencional são apenas formas de representar o sentido em que a corrente está indo. Tentaremos representar sempre que possível a corrente elétrica no sentido eletrônico. Em alguns momentos teremos de representar a corrente no sentido convencional, pois as explicações existentes em quase todos os livros de eletrônica e mesmo o símbolo de determinados componentes se baseiam nesse sentido.

O fato é que não queremos que você seja um purista radical querendo que todos os livros de eletrônica do mundo sejam corrigidos. O fato é que para entender eletrônica o sentido da corrente elétrica normalmente não importa.

Circuito Aberto e Circuito Fechado

A corrente elétrica só existe quando o circuito elétrico está fechado, isto é, os elétrons têm como sair e voltar da fonte de alimentação. Em um circuito aberto, a corrente elétrica é zero, significando que o circuito não está consumindo nada e, portanto, está desligado. Para efeitos de cálculo, consideramos um circuito aberto como tendo resistência infinita. Ver Figura 6.2.

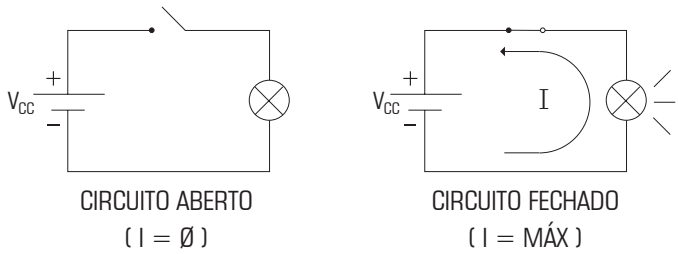


Figura 6.2: Circuito aberto e circuito fechado.

Para que você entenda melhor essa questão, considere o circuito da Figura 6.3. Você pode observar que R2 não está conectado ao circuito (um de seus terminais está desconectado). Com isso, toda a corrente do circuito circula somente através de R1. Assim, a corrente total do circuito circulará apenas em R1, e nenhuma corrente circulará em R2. Consideramos que R2 possui uma resistência infinita porque ele está fora do circuito, mesmo que possua um valor qualquer.

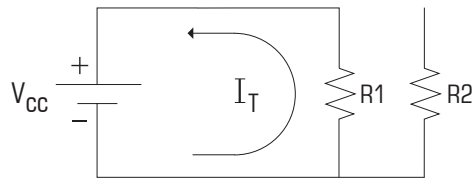


Figura 6.3: Estudo de circuito aberto e circuito fechado.

Curto-Circuito

Curto-circuito é o nome dado a qualquer circuito cuja resistência seja zero. Com resistência zero, a corrente tende a ser infinita, basta observar a Lei de Ohm (equação 4.2) (para efeitos de cálculo, consideramos que qualquer número dividido por zero é igual a infinito). Se você pegar um fio e ligar os dois polos de uma tomada, criará um curto-circuito. Como a resistência de um fio é muito baixa, próxima de zero, você criaria uma corrente infinita na tomada, fazendo com que o fio derretesse, esquentasse e pegasse fogo. Para que isso não ocorra, em sua casa existe uma caixa de força contendo disjuntores ou fusíveis, que são chaves que desarmam quando a corrente elétrica ultrapassa um determinado valor (o que normalmente indica um curto-circuito). A função de disjuntores e fusíveis é evitar que sua casa pegue fogo.

Funcionamento da Corrente Elétrica

A regra básica sobre corrente elétrica é a seguinte: a corrente elétrica vai por todos os caminhos (circuitos) possíveis, de forma a voltar para a fonte de alimentação. Como a resistência elétrica é a oposição da passagem da corrente elétrica, a corrente preferirá passar por um caminho mais fácil de trafegar de forma a retornar para a fonte. Ou seja, nos trechos onde a resistência elétrica for menor, a corrente elétrica será maior, e vice-versa.

Considere a Figura 6.4. Como dissemos, a corrente dá preferência por seguir por onde a resistência for menor. Se R1 possuir uma resistência menor do que R2, isso significa que I_{R1} será obrigatoriamente maior do que I_{R2}. Em outras palavras, a corrente dará preferência por passar por R1, já que o caminho propiciado por ele é mais fácil de ser atravessado para chegar de volta à fonte de alimentação.

Se R1 e R2 possuírem o mesmo valor, isso significa que a corrente será dividida de forma igual, já que não haverá "preferência". Assim, para o caso de R1 e R2 serem de valores iguais, teremos que I_{R1} e I_{R2} terão o mesmo valor: valerão metade da corrente total do circuito (I_T), já que a corrente será dividida de forma igual.

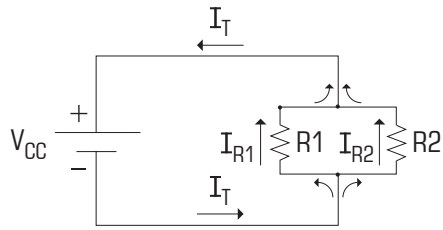


Figura 6.4: Divisão de corrente.

Lei dos Nós

A Lei dos Nós, também conhecida *Lei das Correntes* ou *Primeira Lei de Kirchhoff*, diz que a soma das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem deste mesmo nó. Na Figura 6.5 representamos essa lei (nessa figura estamos assumindo que todas as ramificações desenhadas têm um caminho para voltarem à fonte de alimentação, é claro). Neste caso, a corrente total (I_{TOTAL}) será igual à soma de I1, I2 e I3.

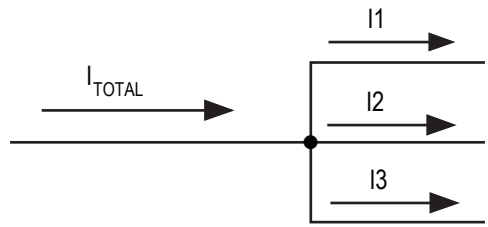


Figura 6.5: Lei dos Nós.

Vamos incrementar os exemplos que havíamos visto no Capítulo 4. Na Figura 6.6 não há qualquer divisão de corrente. Assim, a corrente que circula por R1 é a mesma que circula por R2 e é a mesma que circula por R3, que por sua vez é a corrente total do circuito (I_{TOTAL}). No entanto, como já havíamos estudado no Capítulo 4, a tensão da fonte de alimentação será dividida.

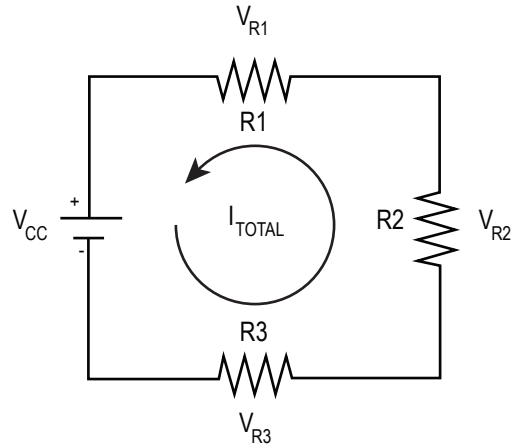


Figura 6.6: Estudo da Lei dos Nós (ver texto).

Já na Figura 6.7 há uma divisão de corrente (nó). Com isso, a corrente total do circuito será dividida em três (I_{R1}, I_{R2} e I_{R3}). Logo, $I_{TOTAL} = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3}$. Neste exemplo não haverá divisão de tensão: as tensões sobre R1, R2 e R3 são iguais à tensão da fonte de alimentação (ver Capítulo 4). A propósito, observe novamente a Figura 6.4. A corrente total desse circuito será igual a $I_{R1} + I_{R2}$.

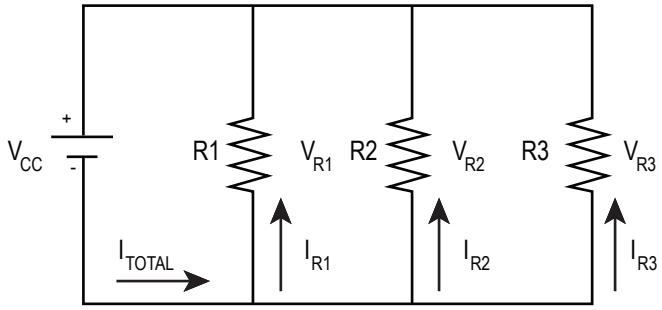


Figura 6.7: Estudo da Lei dos Nós (ver texto).

Na Figura 6.8 temos componentes em série e em paralelo. Neste caso, a corrente que circula por R1 é a corrente total do circuito (I_{TOTAL}), mas esta será dividida entre R2 e R3 ao atingir o nó existente. Ou seja, $I_{TOTAL} = I_{R2} + I_{R3}$. Neste caso, a tensão sobre R2 e sobre R3 é a mesma ($V_{R2} = V_{R3}$), mas a tensão sobre R1 (V_{R1}) é diferente (ver Capítulo 4).

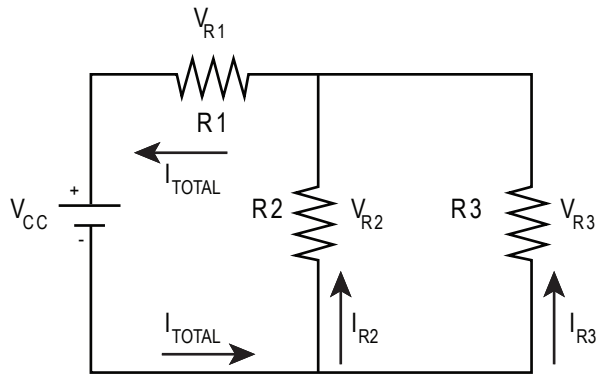


Figura 6.8: Estudo da Lei dos Nós (ver texto).

As implicações práticas diretas da Segunda Lei de Kirschhoff são as seguintes:

1. O valor da corrente que "sai" da fonte de alimentação é sempre igual ao valor da corrente que "volta" à fonte de alimentação.
2. Em um circuito com componentes ligados em paralelo, a corrente é dividida entre eles, ao passo que a tensão sobre eles é a mesma. É importante entender que a corrente não necessa-

riamente será dividida igualmente, isto é, não necessariamente $I_{R1} = I_{R2}$. Isso vai depender do valor das resistências de R1 e R2, como estudaremos a seguir no tópico *Lei de Ohm*.

3. Em um circuito com componentes ligados em série, a corrente que circula é a mesma, ao passo que a tensão sobre os componentes é diferente.

Lei de Ohm

Se você conseguiu entender esses princípios básicos que apresentamos neste capítulo sobre corrente elétrica, então não terá dificuldade alguma em entender eletrônica! A corrente de um circuito pode ser descoberta aplicando a equação descoberta através da Lei de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \tag{6.1}$$

Assim, a corrente I_{R1} do circuito da Figura 6.4 será igual a V_{CC} / R1, enquanto que a corrente I_{R2} será igual a V_{CC} / R2. E a corrente total do circuito (I_{TOTAL}), quanto valerá? Simples: $I_{R1} + I_{R2}$, certo?

A equação pode ser aplicada também em circuitos de tensão alternada. Nesse caso, o único cuidado a ser tomado é o de usar o valor da tensão, o valor eficaz (RMS) da tensão, e não o seu valor de pico.

Como dissemos anteriormente, as letras V e I (que representam, respectivamente, tensão e corrente) quando grafadas em maiúsculas representam valores obtidos em circuitos de corrente contínua, enquanto que, quando grafadas em minúsculas, representam valores obtidos em circuitos de corrente alternada.

◆◆◆

Exercícios

1. Em dois componentes conectados em série, a _____ (tensão/corrente) será a mesma nos dois componentes.
2. Em dois componentes conectados em paralelo, a _____ (tensão/corrente) será a mesma nos dois componentes.
3. No circuito da Figura 6.6, qual é o valor da corrente que circula por R2?
4. No circuito da Figura 6.7, qual é o valor da corrente que circula por R2?
5. No circuito da Figura 6.8, qual é o valor da corrente que circula por R2?

Capítulo 7
Resistência Elétrica

Introdução

Finalmente chegamos à terceira unidade fundamental da eletricidade e, consequentemente, da eletrônica: a resistência elétrica. A resistência elétrica, como já foi dito, é a oposição à passagem da corrente elétrica. A resistência elétrica é medida em uma unidade chamada *ohm* e tem como símbolo a letra grega ômega maiúscula (Ω). Em alguns casos, principalmente em publicações mais antigas, a unidade ohm é abreviada pela letra R. Isso ocorria porque antigamente os livros e revistas eram escritos em máquinas de escrever, que não possuíam o símbolo Ω. Assim, uma resistência de 100 R equivale a uma resistência de 100 Ω. Essa maneira de representar resistência, no entanto, não deve ser mais usada, visto que computadores podem atualmente mostrar e imprimir letras gregas sem problemas.

Simbologia

Qualquer componente que se oponha à passagem da corrente elétrica é chamado *resistor*. Na Figura 7.1 mostramos a simbologia básica de resistores (existem outros, ver Capítulos 2 e 23). O símbolo em forma de zigue-zague indica um resistor "genérico", enquanto que o símbolo em forma de retângulo indica o componente eletrônico chamado resistor, que estudaremos no Capítulo 23. Por exemplo, um alto-falante, por apresentar uma resistência interna, pode ser representado usando o símbolo de resistor. O mesmo ocorre com uma lâmpada incandescente. Nesses dois casos, como o componente é um resistor "genérico" e não o componente chamado resistor, usaríamos o símbolo em forma de zigue-zague.

Em resumo, neste livro estaremos usando o símbolo de zigue-zague sempre em que não estivermos lidando especificamente com o componente eletrônico chamado resistor.

O nome "resistência" como sinônimo de "resistor" deve ser evitado.

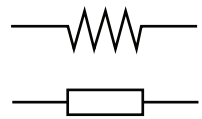


Figura 7.1: Simbologia de resistores.

Condutores e Isolantes

Existem materiais que possuem uma resistência elétrica maior do que outros. Materiais com uma resistência elétrica muito baixa são considerados *condutores*, enquanto que materiais com uma resistência elétrica muito alta são considerados *isolantes*. Por que um fio de cobre permite a passagem da corrente elétrica, mas um pedaço de borracha, não? Porque a borracha possui uma resistência elétrica altíssima (para efeitos práticos, considerada infinito), enquanto que um fio possui uma resistência elétrica baixíssima (para efeitos práticos, considerada zero).

Dentro do próprio grupo de materiais condutores, há materiais que apresentam uma condutibilidade elétrica melhor do que outros (isto é, uma resistência menor). Por exemplo, o cobre apresenta uma resistência mais baixa do que o alumínio, fazendo com que ele seja um melhor condutor.

A borracha nós todos sabemos que é isolante. Se você estiver usando uma luva de borracha e segurar nos fios da tomada de sua casa, não irá tomar choque. Dissemos que para efeitos práticos o valor de sua resistência elétrica é infinito. Infinito para nós que trabalhamos com valores baixos de tensão: para um raio que possui milhares ou milhões de volts, por exemplo, a resistência elétrica da borracha cai bruscamente, pois a tensão do raio supera a rigidez dielétrica da borracha. Mesmo que você se vista todo com uma roupa de borracha grossa, irá tomar um baita choque se tomar um raio na cabeça, e provavelmente morrerá (bem, tem gente que já tomou raio na cabeça e não morreu, mas não é bom contar com a sorte).

Todo isolante tem um limite de rigidez dielétrica, a partir do qual torna-se condutor, até mesmo o ar, que se torna condutor quando há passagem de raios ou faíscas em geral.

Lei de Ohm

Como já falamos, a tensão elétrica, a corrente elétrica e a resistência elétrica possuem uma íntima relação, estabelecida pela seguinte equação:

$$R = \frac{V}{I} \tag{7.1}$$

Agora que acabamos de apresentar a resistência elétrica, vamos a um exercício prático para o circuito que apresentamos na Figura 7.2. Se a fonte de alimentação for de 12 V, R1 for um resistor de 100 Ω e R2 for um resistor de 300 Ω, qual é a corrente consumida pelo circuito?

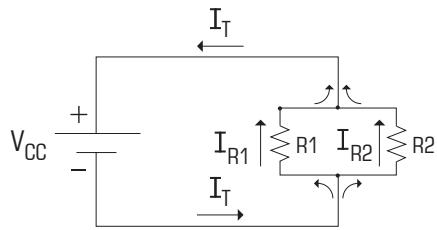


Figura 7.2: Exercício (ver texto).

Como R1 e R2 estão em paralelo, a tensão sobre eles é a mesma: a tensão da fonte. Assim, temos que:

$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R1} = \frac{V_{CC}}{R1} = \frac{12\ V}{100\ \Omega} = 0{,}12\ A = 120\ mA \tag{7.2}$$

e

$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{V_{CC}}{R2} = \frac{12\ V}{300\ \Omega} = 0{,}04\ A = 40\ mA \tag{7.3}$$

Pela Lei dos Nós (Primeira Lei de Kirchhoff) sabemos que a corrente total será a soma de I_{R1} e I_{R2}, logo:

$$I_{TOTAL} = I_{R1} + I_{R2} = 120\ mA + 40\ mA = 160\ mA \tag{7.4}$$

Repare que, como dissemos anteriormente, a corrente é maior onde a resistência for menor: I_{R1} é três vezes maior do que I_{R2}, justamente porque R1 possui uma resistência menor do que R2. Repare também na proporção: como o valor de R2 é três vezes maior que o de R1, a sua corrente é exatamente três vezes menor (hum, que interessante! Isso nos poderá ser muito útil!).

Ligação de Resistores em Série

Quando temos resistores em série, a resistência total será a soma dos resistores do circuito em série. Resumimos isso na Figura 7.3. Por exemplo, em um circuito com dois resistores em série, um de 100 Ω e outro de 300 Ω, a resistência total do circuito será de 400 Ω. Normalmente chama-se o valor da resistência total de R_{TOTAL}, R_T ou R_{EQ} (de "equivalente").

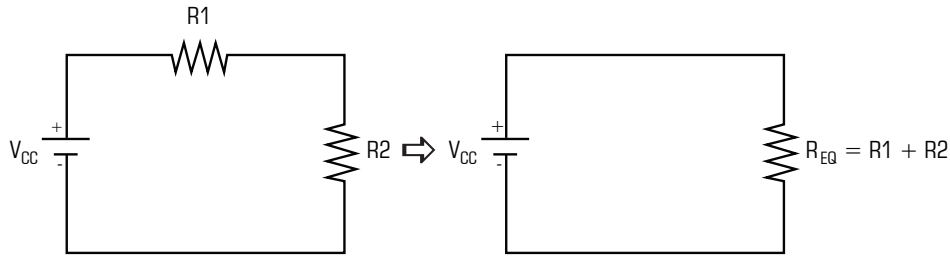


Figura 7.3: Cálculo de resistores em série.

Em cálculos de resistores em série, o valor da resistência equivalente será sempre maior do que o valor do maior resistor incluso. Essa dica serve para você conferir, de uma forma rápida, se o resultado encontrado quando você efetuar cálculos está ou não dentro da faixa esperada. Caso não esteja, você saberá que o resultado dos seus cálculos está errado.

Ligação de Resistores em Paralelo

No caso de resistores em paralelo, a resistência total será dada pela fórmula:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} + \ldots \qquad (7.5)$$

Resumimos isso na Figura 7.4.

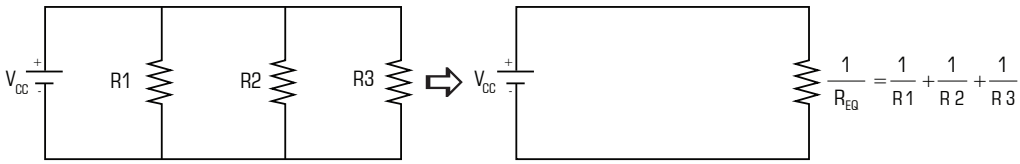


Figura 7.4: Cálculo de resistores em paralelo.

Por exemplo, em um circuito com três resistores em paralelo, um de 400 Ω, um de 300 Ω e um de 500 Ω, a resistência total será de 127,66 Ω.

Em calculadoras científicas o botão para calcular 1 / x chama-se x^{-1}.

No caso de apenas dois resistores em paralelo, há uma fórmula simplificada que pode ser usada:

$$R_{EQ} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \tag{7.6}$$

Resumimos isso na Figura 7.5.

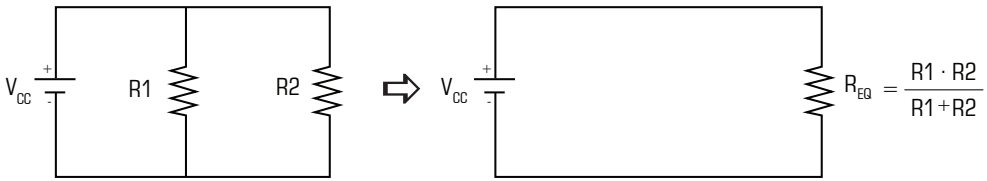


Figura 7.5: Cálculo de dois resistores em paralelo.

Resistores com valores iguais ligados em paralelo possuem como resistência total o seu valor dividido pelo número de resistores. Dois resistores de 100 Ω em paralelo terão como resistência total 50 Ω, ao passo que três resistores de 100 Ω em paralelo terão como resistência total 33,33 Ω.

Em cálculos de resistores em paralelo, o valor da resistência equivalente será sempre menor do que o valor do menor resistor incluso. Essa dica serve para você conferir, de uma forma rápida, se o resultado encontrado quando você efetuar cálculos está ou não dentro da faixa esperada. Caso não esteja, você saberá que o resultado dos seus cálculos está errado.

Ligação de Resistores em Série e em Paralelo ao Mesmo Tempo

Para calcular a resistência total de um circuito que tenha tanto resistores em paralelo quanto em série, você deve começar calculando as resistências equivalentes a partir do ponto mais distante da fonte de alimentação, começando pelos resistores em paralelo, caso existam. Considere a Figura 7.6. Primeiro calculamos o valor equivalente dos resistores mais distantes da fonte (R2 e R3), que estão em paralelo. Em seguida basta somar este resultado ao valor do resistor que está em série, dando a resistência total deste circuito. Por exemplo, considerando que R1 = 100 Ω, R2 = 900 Ω e R3 = 400 Ω, teremos como resistência total do circuito 377 Ω.

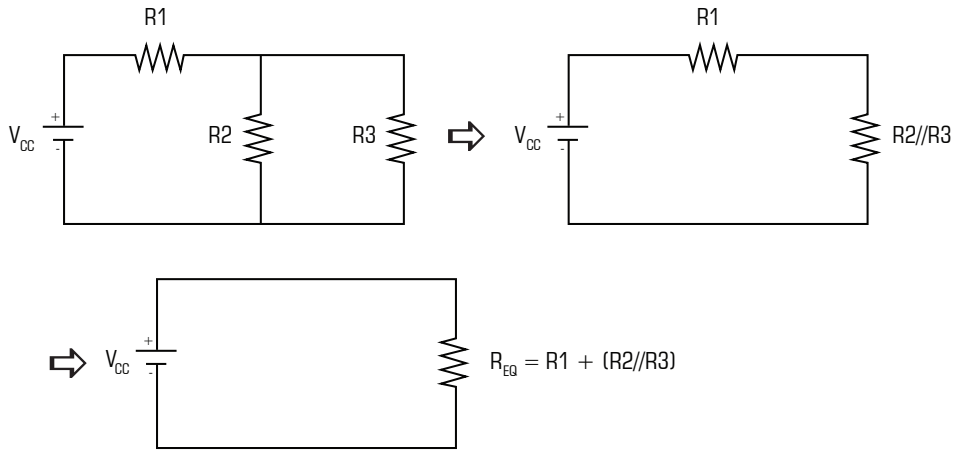


Figura 7.6: Cálculo de resistência total para resistências em série e em paralelo ao mesmo tempo.

Quando estamos fazendo cálculos normalmente indicamos dois resistores em paralelo com duas barras (//).

No caso de circuitos com vários resistores em série e em paralelo você deve tomar muito cuidado para não se confundir na hora de efetuar os cálculos. Para efetuar cálculos de resistências equivalentes recomendamos sempre que você redesenhe o circuito a cada etapa, como fizemos na Figura 7.6. Para fixarmos a matéria, considere o circuito da Figura 7.7. Repare as etapas feitas para

chegarmos ao valor da resistência total. Neste exemplo, se R1 = 4,7 kΩ, R2 = 560 Ω, R3 = 10 kΩ e R4 = 2,2 kΩ, o valor da resistência equivalente deste circuito será de 1.572 Ω (1,5 kΩ).

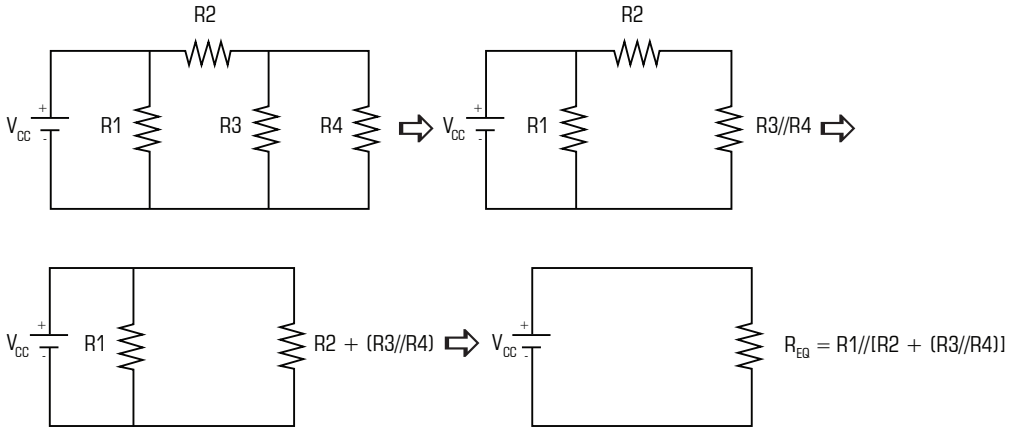


Figura 7.7: Exemplo de resolução de cálculo de resistência equivalente.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é o valor da tensão sendo aplicada sobre R1 na Figura 7.8? E qual é o valor da corrente que passa em R1?

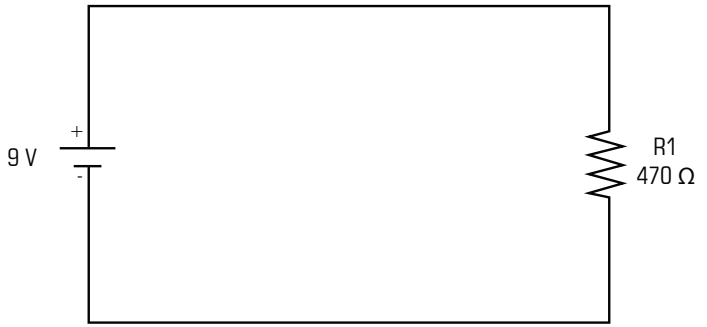


Figura 7.8: Qual é o valor da tensão e corrente em R1?

2. Considere o circuito anteriormente apresentado na Figura 7.7. Calcule a resistência equivalente deste circuito considerando R1 = 470 Ω, R2 = 3,3 kΩ, R3 = 220 Ω e R4 = 1 kΩ.

3. Qual é o valor da corrente I_T consumida pelo circuito abaixo?

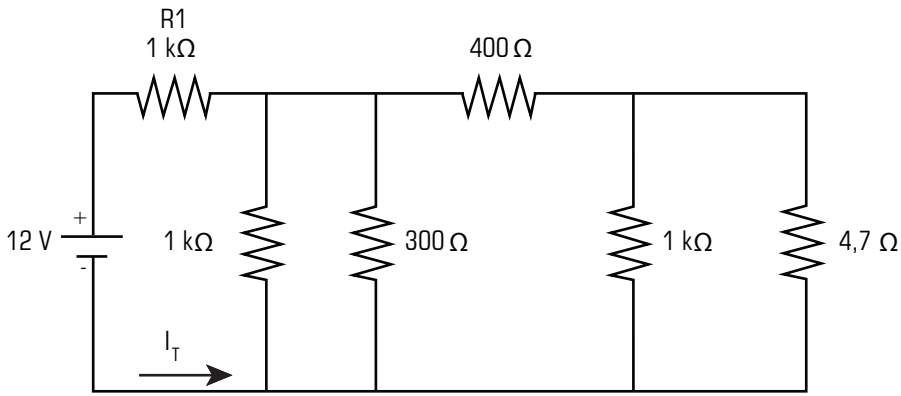


Figura 7.9: Qual é o valor de Ir?

4. Qual é o valor da tensão que está sendo aplicada sobre R1 na Figura 7.9?

5. Qual é o valor da tensão que está sendo aplicada sobre R3 na Figura 7.10?

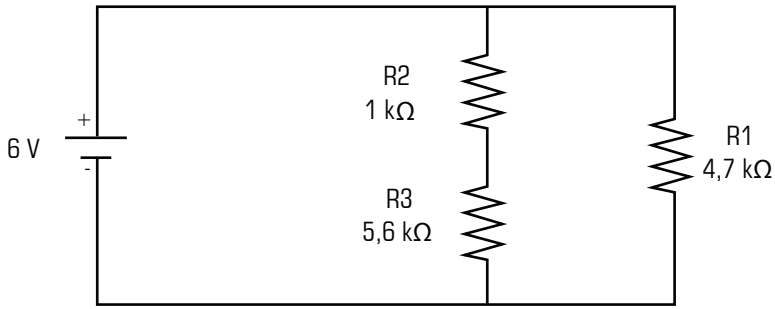


Figura 7.10: Qual é o valor da tensão sobre R3?

Capítulo 8
Impedância

Introdução

Em circuitos de tensão contínua, o único tipo de oposição à passagem de corrente elétrica que existe é a resistência elétrica. Em circuitos eletrônicos, a resistência é tipicamente feita através de um componente chamado *resistor*. Já em circuitos de tensão alternada, além da resistência, há duas grandezas que se opõem à passagem da corrente elétrica: a *reatância capacitiva* e a *reatância indutiva*.

A reatância capacitiva é inserida no circuito através de um efeito capacitivo – por exemplo, se houver um componente chamado *capacitor* no circuito. Já a reatância indutiva é inserida no circuito através de um efeito indutivo – por exemplo, se houver um *indutor* (uma bobina) no circuito.

Falando agora em português: capacitores e indutores são componentes que só "funcionam" em corrente alternada. Quando instalados em um circuito de corrente contínua, um capacitor funciona como um circuito aberto (isto é, não deixa passar a corrente elétrica), enquanto que um indutor (uma bobina) funciona como um circuito fechado (isto é, deixa passar a corrente elétrica). Estudaremos melhor os capacitores e bobinas nos Capítulos 24 e 25 do livro.

Como estamos falando, capacitores e bobinas quando instalados em um circuito de corrente alternada geram uma oposição à passagem da corrente elétrica, chamada *reatância*, que é medida em ohms (símbolo Ω) e abreviada pela letra X. A reatância indutiva é abreviada por X_L e a reatância capacitiva, por X_C.

Impedância é a soma vetorial da resistência, da reatância capacitiva e da reatância indutiva de um circuito. A impedância é medida em ohms e abreviada pela letra Z.

Em um circuito de tensão contínua, como não existe reatância capacitiva nem reatância indutiva, a impedância é igual à resistência. É por esse motivo que muitas vezes pessoas pensam que resistência e impedância são sinônimos. Isso só é válido para circuitos de tensão contínua.

Já em circuitos de tensão alternada, a impedância é a real oposição da passagem da corrente elétrica, levando-se em conta o efeito criado pela resistência e pelos capacitores e indutores (bobinas).

Reatância Indutiva

A reatância indutiva de um indutor pode ser facilmente calculada através da fórmula:

$$X_L = 2\pi fL \quad (8.1)$$

Onde f é a frequência da tensão alternada e L é a indutância da bobina, dada em uma unidade chamada henry (símbolo: H). Para quem não lembra, π vale aproximadamente 3,1416.

Em cálculos de circuitos de corrente alternada, a expressão $2\pi f$ é muito usada, sendo muitas vezes representada por ω (que é a letra grega ômega em minúscula; Ω é a letra grega ômega em maiúscula). Esse valor é chamado de frequência angular ou velocidade angular, pois é dado em radianos por segundo. Assim, essa fórmula também poderia ser representada como $X_L = \omega L$.

Por exemplo, supondo um circuito de corrente alternada contendo apenas uma bobina com indutância de 1 H e uma frequência de 1 kHz (1.000 Hz), então a reatância indutiva desse circuito será de 6.283,18 Ω.

Para calcular a reatância indutiva total de duas ou mais bobinas, basta seguir as mesmas fórmulas usadas para resistores. Ou seja, em duas bobinas chamadas L1 e L2 ligadas em série, a reatância indutiva total será $X_{L1} + X_{L2}$. Com essas duas bobinas ligadas em paralelo, a reatância indutiva total será $(X_{L1} \cdot X_{L2}) / (X_{L1} + X_{L2})$, que é a mesma fórmula usada para se encontrar a resistência total de dois resistores ligados em paralelo.

Em um circuito de tensão contínua, a frequência é igual a zero. Com isso, a reatância indutiva de qualquer bobina ligada em um circuito de tensão contínua será igual a zero. É por esse motivo que, quando conectado a um circuito de tensão contínua, um indutor funciona como se fosse simplesmente um fio: sua "resistência" (reatância) será igual a zero.

Reatância Capacitiva

A reatância capacitiva de um capacitor pode ser facilmente calculada usando a seguinte fórmula:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (8.2)$$

Onde f é a frequência da tensão alternada e C é a capacitância do capacitor, dada em farad (símbolo: F). Como dissemos, em cálculos de circuitos de corrente alternada, a velocidade angular ω (igual a $2\pi f$) é muito usada. Assim, essa fórmula também poderia ser representada como $X_C = 1 / \omega C$.

Por exemplo, supondo um circuito de corrente alternada contendo apenas um capacitor com capacitância de 10 μF (0,00001 F) e frequência de 1 kHz (1.000 Hz), então a reatância capacitiva desse circuito será de 15,92 Ω.

Para calcular a reatância capacitiva total de dois ou mais capacitores, basta seguir as mesmas fórmulas usadas para resistores. Ou seja, em dois capacitores chamados C1 e C2 ligados em série, a reatância capacitiva total será $X_{C1} + X_{C2}$. Com esses dois capacitores ligados em paralelo, a reatância capacitiva total será $(X_{C1} \cdot X_{C2}) / (X_{C1} + X_{C2})$, que é a mesma fórmula usada para se encontrar a resistência total de dois resistores ligadas em paralelo.

Em um circuito de tensão contínua, a frequência é igual a zero. Com isso, a reatância capacitiva de qualquer capacitor ligado em um circuito de tensão contínua será igual a infinito (em eletrônica consideramos qualquer número dividido por zero como sendo igual a infinito). É por esse motivo que, quando conectado a um circuito de tensão contínua, um capacitor não funciona, agindo como um circuito aberto: sua "resistência" (reatância) será igual a infinito.

Reatâncias Diferentes em um Mesmo Circuito

Vimos que, em circuitos contendo somente um tipo de reatância, o cálculo da reatância total do circuito será feito da mesma forma que o cálculo da resistência total em circuitos puramente resistivos: somando as reatâncias quando os componentes estão em série e usando a fórmula $X = (X1 \cdot X2) / (X1 + X2)$ quando os componentes estão em paralelo.

Esse método só pode ser efetuado quando os componentes são iguais e só existem componentes do mesmo tipo no circuito. Isto é, para o cálculo da reatância total em um circuito onde só existam dois capacitores e nenhuma bobina, por exemplo.

No entanto, quando misturamos em um mesmo circuito bobinas e capacitores, o cálculo da impedância total não pode ser feito dessa forma. Isso ocorre porque tanto indutores quanto capacitores geram uma defasagem entre a corrente e a tensão do circuito (ver Figura 8.1). Em outras palavras, o momento em que a tensão atinge o seu valor máximo (valor de pico) não é o mesmo momento em que a corrente atinge o seu valor máximo. Essa diferença entre o valor máximo da tensão e da corrente é justamente o que chamamos de defasagem.

Capacitores e indutores geram uma defasagem de 90º entre a tensão e a corrente. Isso significa que, quando a tensão atinge o seu pico máximo, a corrente é zero e, quando a tensão é zero, a

corrente atinge o seu pico máximo. A diferença entre capacitores e indutores é que, em capacitores, a corrente vem 90º antes da tensão e, em indutores, a tensão vem 90º antes da corrente.

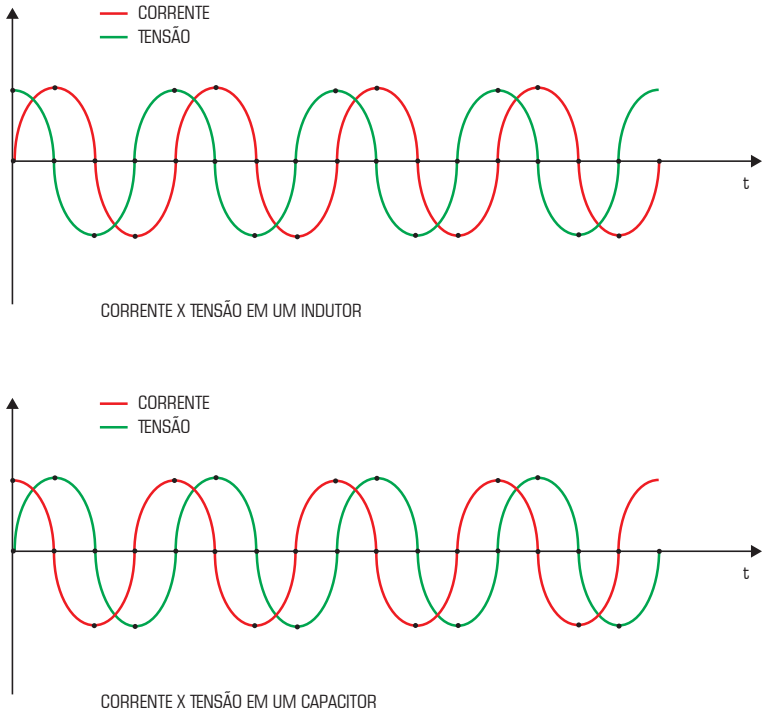


Figura 8.1: Relação entre tensão e corrente em indutores e capacitores.

Para ficar mais claro, observe a Figura 8.1 para entender a relação entre tensão e corrente em indutores e capacitores.

Por causa dessa defasagem existente, o cálculo da reatância total de um circuito onde existam capacitores e indutores vai depender se os circuitos estão em série ou em paralelo.

Circuito LC em Série

Em um circuito em série, como vemos na Figura 8.2, a corrente no capacitor (C) e no indutor (L) será a mesma. A tensão aplicada sobre cada componente (V_L e V_C) será diferente.

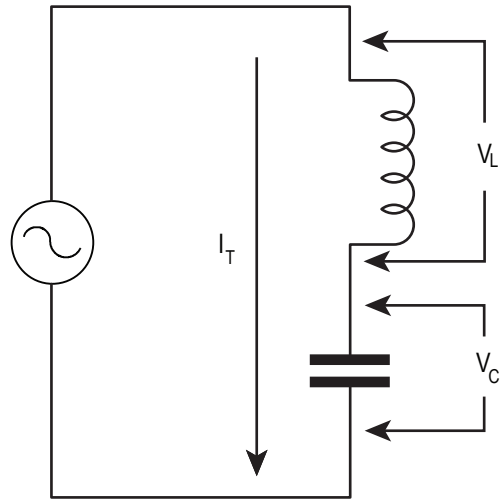


Figura 8.2: Circuito LC em série.

Como o capacitor faz com que a tensão sobre ele (V_C) venha 90º depois da corrente, e como o indutor faz com que a tensão sobre ele (V_L) venha 90º antes da corrente, e como nesse circuito a corrente é a mesma para os dois componentes, isso significa que I_L e I_C estarão defasados 180º entre si, ou seja, serão opostos entre si (uma defasagem de 180º significa que, quando um valor atinge o seu pico máximo, o outro valor atinge o seu pico mínimo – ver Capítulo 5).

Isso significa que a tensão da fonte será igual à diferença de V_L e V_C. A reatância total será, então, $X = (V_L - V_C) / I_T$. Como $V_L = X_L \cdot I_L$ e $V_C = X_C \cdot I_C$ e como I_L e I_C são iguais à corrente total do circuito (I_T), basta substituirmos na primeira fórmula essas duas outras para chegarmos à conclusão que:

$$X = X_L - X_C \tag{8.3}$$

Se o resultado dessa conta der positivo, isso significa que a reatância predominante no circuito é a indutiva, ao passo que, se o resultado der negativo, isso significa que a reatância predominante no circuito é a capacitiva.

Você também pode reparar que a reatância total sempre será menor que a maior das reatâncias do circuito.

Supondo o circuito da Figura 8.2 com $X_L = 500\ \Omega$ e $X_C = 100\ \Omega$, teríamos que a reatância total do circuito é de 400 Ω, sendo uma reatância predominantemente indutiva. Já com $X_L = 300\ \Omega$ e $X_C = 500\ \Omega$, teríamos que a reatância total do circuito é de -200 Ω, sendo uma reatância predominantemente capacitiva.

Note que o sinal de + ou de - em reatâncias é usado apenas para indicar se a reatância total é indutiva ou capacitiva sem a necessidade de adicionar uma palavra como "indutiva" ou "capacitiva" ao lado do valor; o sinal de + ou - desempenha esse papel.

Circuito LC em Paralelo

Já em circuitos em que o indutor e o capacitor estão em paralelo, como mostra a Figura 8.3, a conta para encontrarmos a reatância total do circuito é diferente.

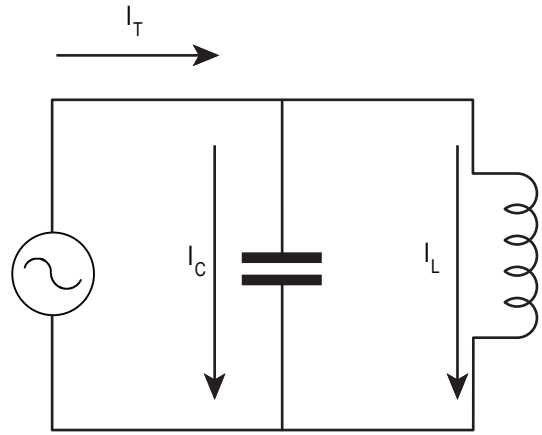


Figura 8.3: Circuito LC em paralelo.

Nesse caso, a tensão em cima do capacitor (V_C) e do indutor (V_L) é a mesma, isto é, é igual à tensão da fonte de alimentação. Por outro lado, as correntes consumidas pelo capacitor (I_C) e pelo indutor (I_L) é que são diferentes, já que há um nó (divisão de corrente).

Como o capacitor faz com que a sua corrente venha 90º antes da tensão e o indutor faz com que a sua corrente venha 90º depois da tensão, temos que I_C e I_L possuem uma diferença de fase de 180º entre si, isto é, quando a corrente do capacitor está em seu pico máximo, a corrente do indutor está em seu pico mínimo. Dessa forma, a corrente total do circuito será dada por $I_L - I_C$.

Assim, aplicando a equação $R = V / I$, temos que a reatância total do circuito será $X = V / (I_L - I_C)$. Como $I_L = V / X_L$ e $I_C = V / X_C$, basta substituirmos esses dois valores na fórmula dada para encontrarmos a seguinte fórmula, após os cálculos:

$$X = \frac{(-X_L \cdot X_C)}{(X_L - X_C)} \qquad (8.4)$$

Por exemplo, um capacitor com $X_C = 100\ \Omega$ em paralelo com um indutor com $X_L = 300\ \Omega$ dará uma reatância total de -150 Ω. Como dissemos anteriormente, o resultado dando positivo significa que a reatância total é indutiva, enquanto que o resultado, dando negativo, a reatância total é capacitiva (como foi o caso do nosso exemplo).

Curiosamente você pode reparar que as fórmulas para cálculo de reatâncias em série e em paralelo são quase que as mesmas usadas por resistências em série e em paralelo. A diferença, contudo, está na existência dos sinais de subtração, que justamente indicam que há uma diferença de fase, fazendo com que a conta dê certo.

Cálculo de Impedância

Como já explicamos, a impedância é toda oposição à passagem da corrente elétrica. Em princípio, a impedância é a soma da resistência, da reatância capacitiva e da reatância indutiva de um circuito.

Em circuitos onde só exista um resistor ou só um capacitor ou só um indutor, a impedância será dada simplesmente pelo valor da resistência ou da reatância existente. Por exemplo, caso em um circuito o único componente existente seja um capacitor, a impedância do circuito será o valor da reatância capacitiva desse capacitor. Já havíamos visto que em circuitos de corrente contínua consideramos apenas a resistência para calcular a impedância, já que capacitores e indutores não possuem função nesse tipo de circuito.

Quando o circuito não tem resistores e tem, ao mesmo tempo, capacitores e indutores, a impedância será igual à reatância total do circuito. A reatância total do circuito nós acabamos de ver como é calculada, e o cálculo depende se o capacitor e o indutor estão em série ou em paralelo.

O problema ocorre quando temos, em um mesmo circuito, resistência e reatância. Vimos que a reatância consome corrente 90º defasado da tensão: 90º antes, se a reatância total for capacitiva,

ou 90º depois, se a reatância total for indutiva. Já a resistência consome corrente elétrica em fase com a tensão. Assim, sempre haverá uma diferença de fase de 90º entre a corrente consumida pela resistência e a corrente consumida pela reatância total do circuito, fazendo com que a impedância do circuito não seja uma simples soma entre a resistência e a reatância total do circuito.

Para calcularmos a impedância de um circuito onde exista tanto resistência quanto reatância, deveremos fazer uma *soma vetorial*.

A maneira com que essa soma vetorial é feita depende se os componentes do circuito estão em série ou em paralelo.

Cálculo de Impedância com Componentes em Série

Se as reatâncias e a resistência estiverem em série, a impedância pode ser calculada fazendo uma soma vetorial direta. Normalmente essa soma é expressa no seguinte formato:

Esse formato indica uma soma entre R e X, e a letra "j" indica que X possui uma defasagem de 90º em relação a R.

$$Z = R \pm jX \tag{8.5}$$

Por exemplo, em um circuito onde a reatância total seja de 20 Ω e a resistência total seja de 100 Ω, a impedância pode ser representada como:

$$Z = 100 \pm j20\,\Omega \tag{8.6}$$

A letra "j" é representação de número imaginário ($\sqrt{-1}$). Números imaginários normalmente são representados pela letra "i", mas em eletrônica a letra "i" indica corrente. Se você nunca estudou números imaginários, isso não tem a menor importância. Basta saber que o "j" indica uma defasagem de 90º.

A forma gráfica de representar essa impedância que estamos dando como exemplo é mostrada na Figura 8.4. Note que o valor da reatância total de nosso exemplo é um número positivo, indicando que a reatância total é indutiva. Um valor negativo indicaria que a reatância total é capacitiva.

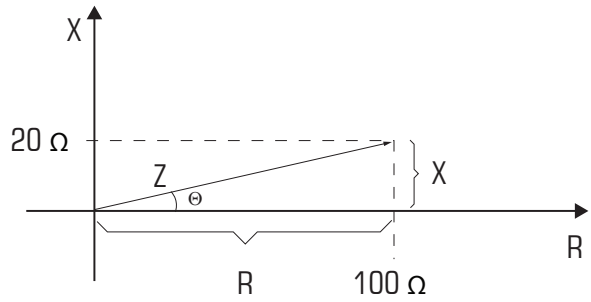


Figura 8.4: Cálculo de impedância.

Quanto é que vai valer Z? Se você reparar, o vetor Z é a hipotenusa de um triângulo retângulo, e o valor da resistência e da reatância são os catetos. Assim, basta aplicar o Teorema de Pitágoras ($a^2 = b^2 + c^2$, onde a é a hipotenusa e b e c são os catetos) para acharmos o valor da impedância:

$$Z^2 = X^2 + R^2 \tag{8.7}$$

Ou seja:

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} \tag{8.8}$$

Em nosso exemplo, a impedância do circuito será de 101,98 Ω. Para expressar corretamente o valor de uma impedância, é necessário também indicar o seu ângulo, isto é, sua defasagem. Esse ângulo, indicado com a letra grega teta minúscula (θ) na Figura 8.4, pode ser facilmente calculado igualmente usando uma fórmula simples da trigonometria, onde a tangente de um ângulo é o valor do cateto oposto ao ângulo dividido pelo cateto adjacente ao ângulo. Nisso, temos que:

$$\tan\theta = \frac{X}{R} \tag{8.9}$$

ou seja:

$$\theta = \arctan\frac{X}{R} \tag{8.10}$$

Arcotangente é a operação usada para se achar um ângulo a partir de sua tangente. Em calculadoras, essa operação é abreviada como $\tan^{-1}$. Para fazer essa conta em calculadoras, não se esqueça de colocá-la em modo de visualização de ângulo (degree), já que as calculadoras normalmente fazem operações trigonométricas em radianos. Se você não fizer isso o cálculo sairá errado.

Em nosso exemplo, $\theta = 11{,}30^{o}$.

Assim, a impedância do circuito que estamos dando de exemplo pode ser expressa de duas formas: $100 \pm j20\ \Omega$ ou $101{,}98\ \Omega\ \angle 11{,}30^{o}$. As duas significam a mesma coisa. Na primeira representação a impedância está representada, porém não foi calculada. Já na segunda representação, também chamada *coordenada polar*, a impedância foi devidamente calculada.

Cálculo de Impedância com Componentes em Paralelo

Para o caso de circuitos onde o resistor e a reatância total estejam em paralelo, em princípio bastaria usar a fórmula para se achar resistências em paralelo:

$$Z = \frac{R \cdot X}{R + X} \tag{8.11}$$

O problema é que R e X estão defasados 90º como vimos. Para efetuar a soma presente no denominador, vimos que poderíamos usar o Teorema de Pitágoras ($a^2 = b^2 + c^2$). Assim, a fórmula correta para o cálculo de impedância em circuitos com reatância e resistência em paralelo é:

$$Z = \frac{R \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \tag{8.12}$$

E o ângulo θ é dado por:

$$\theta = \arctan \frac{X}{R} \tag{8.13}$$

Independentemente se o circuito está em série ou em paralelo, o ângulo θ sendo positivo indica uma reatância total indutiva, enquanto que o ângulo θ sendo negativo indica uma reatância total capacitiva.

Ressonância

A ressonância em circuitos LC é um fenômeno que ocorre quando conseguimos equilibrar as reatâncias de um circuito, ou seja, quando $X_L = X_C$. Podemos dizer também que o circuito está *sintonizado*.

O que ocorre depende se a bobina e o capacitor estão conectados em série ou em paralelo.

Se estiverem conectados em série, significa que a corrente que passa sobre os dois é a mesma (I_T), porém a tensão é diferente (V_L e V_C). Vimos também que V_L e V_C possuem uma diferença de fase de 180º, isto é, quando um está em seu pico máximo, o outro está em seu pico mínimo. Se V_L e V_C forem iguais – condição que é conseguida quando X_L e X_C forem iguais –, as duas tensões se anularão e farão com que a tensão sobre o circuito caia para zero. No instante em que isso ocorrer, as reatâncias também cairão para zero (R = V / I; zero dividido por qualquer número é igual a zero). A corrente, então, tenderá ao infinito (no âmbito da eletrônica define-se que qualquer número dividido por zero, inclusive o próprio zero, dá como resultado infinito, apesar de, em teoria, zero dividido por zero ser classificado como uma indeterminação matemática).

Já se o capacitor e a bobina estiverem conectados em paralelo, significa que a tensão sobre os dois é a mesma (tensão da fonte de alimentação), porém a corrente é diferente (I_L e I_C), como estudamos anteriormente. Vimos que I_L e I_C possuem uma diferença de fase de 180º, isto é, quando um está em seu pico máximo, o outro está em seu pico mínimo. Se I_L e I_C forem iguais – condição que é conseguida quando X_L e X_C forem iguais –, as duas correntes se anularão, fazendo com que a corrente seja igual a zero. No instante em que isso ocorrer, a reatância total do circuito tenderá a infinito (R = V / I; em eletrônica assumimos que qualquer número dividido por zero dá como resultado infinito).

Ou seja, quando o circuito está em ressonância a corrente ou a reatância tende ao infinito, dependendo se o indutor e o capacitor estão conectados em série ou em paralelo, respectivamente.

Vimos que, para o circuito entrar em ressonância, as reatâncias capacitiva e indutiva precisam ser iguais. Para que isso ocorra, há três variáveis envolvidas: o valor do indutor, em henrys; o valor do capacitor, em farads; e a frequência.

Em um circuito já montado, os valores do indutor e do capacitor são normalmente fixos. Isso significa que sempre existirá uma frequência na qual o circuito entrará em ressonância. Essa frequência é justamente conhecida como *frequência de ressonância*.

O gráfico apresentado na Figura 8.5 mostra o que ocorre com a corrente (em circuitos em série) ou com a reatância (em circuitos em paralelo) dependendo da frequência da tensão alternada. Repare que o valor da corrente ou reatância tende a ficar estável independentemente da frequência da fonte. Porém, quando a frequência da fonte é igual à frequência de ressonância, a corrente ou a reatância do circuito tende a infinito.

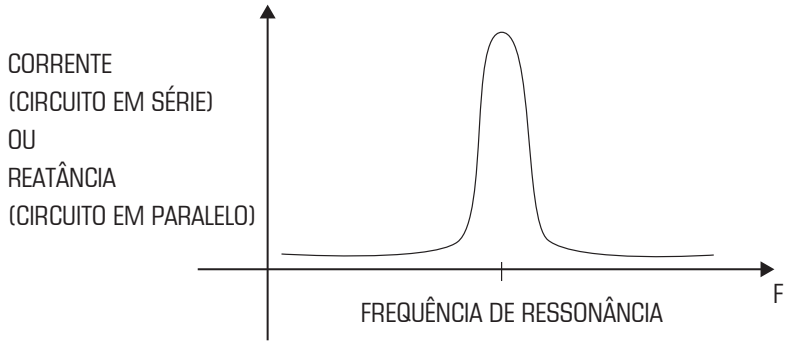


Figura 8.5: O que ocorre na ressonância.

A frequência de ressonância pode ser facilmente encontrada, já que o circuito entra em ressonância quando $X_L = X_C$, ou seja, quando $2\pi fL = 1 / (2\pi fC)$. Resolvendo essa equação, encontramos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{8.14}$$

Por exemplo, em um circuito com uma bobina de 100 mH e um capacitor de 10 μF, a frequência de ressonância será de 159,16 Hz.

A ressonância é um efeito extremamente útil em diversas situações. Ela transforma o circuito contendo uma bobina e um capacitor em um circuito sintonizador, fazendo com que a corrente ou a reatância do circuito suba muito (tendendo a infinito) quando a frequência de ressonância é atingida. Rádios, por exemplo, se baseiam nesse fenômeno para poderem sintonizar as estações. Sintonizadores de rádio usam um capacitor variável (um capacitor que muda sua capacitância através de um botão de ajuste) para atingirem a ressonância com a frequência de uma rádio. Quando isso ocorre, o circuito deixa passar somente o sinal captado da frequência de ressonância (a frequência de sintonia da rádio) e bloqueia as demais frequências (bloqueando o sinal vindo de outras rádios). Basta ver o gráfico apresentado na Figura 8.5 para ver que um circuito em ressonância bloqueia todas as frequências, menos a frequência de ressonância.

Assim, a ressonância é extremamente usada em circuitos de filtro. Se quisermos criar um filtro para que ele bloqueie todas as frequências menos uma determinada frequência, poderíamos usar facilmente um circuito contendo um capacitor e uma bobina para fazer com que todas as demais frequências fossem bloqueadas e a frequência de ressonância pudesse "passar". Esse tipo de filtro é chamado passa-faixa.

Exercícios

1. Em um circuito de tensão contínua, a impedância é igual à:
   a. Reatância indutiva do circuito
   b. Reatância capacitiva do circuito
   c. Resistência do circuito
   d. Zero
2. Qual é o valor da reatância indutiva de qualquer bobina ligada em um circuito de tensão contínua?
3. Qual é o valor da reatância capacitiva de qualquer capacitor ligado em um circuito de tensão contínua?
4. Se quisermos projetar um filtro passa-faixa ajustado na frequência de 1 kHz usando uma bobina de 100 mH em paralelo com um capacitor, qual deverá ser o valor desse capacitor?
5. Qual é a impedância do circuito abaixo (encontre o resultado também em coordenada polar)?

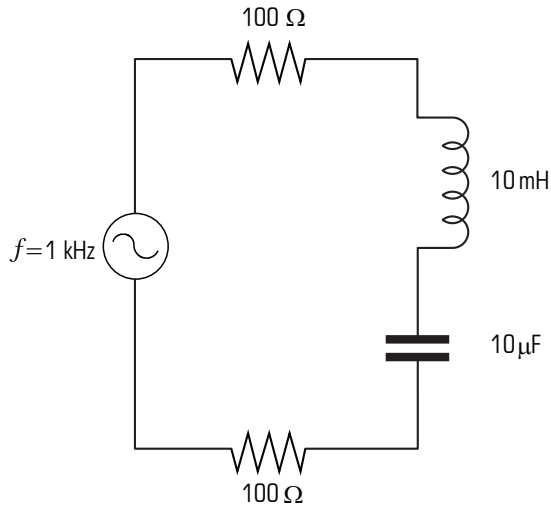


Figura 8.6: Circuito RLC.

6. Qual é a frequência de ressonância do circuito acima?

Capítulo 9
Potência Elétrica

Introdução

Potência é a capacidade de transformação da energia elétrica em outro tipo de energia, normalmente calor, movimento ou som. A potência é medida em uma unidade chamada *watt* (cuja pronúncia correta é uát e não vát, como muita gente fala de forma errônea) e é simbolizada pela letra W.

A definição de potência é:

$$P = \frac{E}{t} \tag{9.1}$$

Onde E é a energia transformada e t é o tempo gasto nessa transformação. Com isso, 1 W equivale a 1 J (joule, unidade de energia) por segundo.

Qual é a diferença entre uma lâmpada de 20 W e uma lâmpada de 100 W? A diferença é que na lâmpada de 100 W mais eletricidade é transformada em calor a cada segundo do que na lâmpada de 20 W. Ou seja, uma lâmpada de 100 W esquenta cinco vezes mais do que uma lâmpada de 20 W. A potência de uma lâmpada, em princípio, não tem nada a ver com a quantidade de luz que ela é capaz de produzir. Tanto que uma luz branca de 20 W pode produzir tanto ou mais luz do que uma lâmpada incandescente de 100 W. A quantidade de luz que um dispositivo produz é medida usando outra unidade, chamada *lumem*.

A potência de um componente pode ser facilmente calculada através da seguinte fórmula:

$$P = V \cdot I \tag{9.2}$$

Aplicando a equação da corrente (4.2) (I = V / R) a esta fórmula, podemos deduzir que:

$$P = \frac{V^2}{R} \tag{9.3}$$

$$P = R \cdot I^2 \tag{9.4}$$

Dessa forma, em um circuito simples de um resistor de 100 Ω conectado a uma fonte de 12 V, qual será a potência dissipada por este componente? Será de 1,44 W. Essa potência será, portanto, o quanto esse resistor dissipará em forma de calor.

Vários componentes eletrônicos, como resistores, por exemplo, são classificados de acordo com a sua potência máxima de dissipação. Se tentar dissipar mais potência do que "aguenta", ele queimará. No circuito que demos como exemplo no parágrafo anterior, se usássemos um resistor de 1/2 W, ele queimaria, já que o circuito estava forçando a dissipar 1,44 W, potência muito superior à máxima admissível para ele.

A mesma ideia pode ser aplicada de uma forma muito mais simples se considerarmos aparelhos de som. Se você conectar um alto-falante que só aguenta 50 W a um amplificador que gera 200 W e colocar o amplificador em seu volume máximo, queimará o alto-falante.

Outro detalhe importante é a diferença entre potência nominal e real. Quando você compra uma lâmpada de 220 V e 100 W, isso não significa que a potência dissipada por ela será sempre de 100 W, mas que será de 100 W quando estiver ligada a uma diferença de potencial de 220 V. Se você ligar essa mesma lâmpada em 127 V, a potência dissipada por ela será bem mais baixa do que a sua potência rotulada.

Máxima Transferência de Potência

Toda fonte de alimentação possui uma impedância interna, que normalmente consideramos ser desprezível. Entretanto, se analisarmos atentamente o efeito dessa impedância interna da fonte no circuito que ela alimenta, chegamos a uma conclusão bastante interessante: a fonte só é capaz de transmitir o máximo de potência quando a resistência interna da fonte é igual à resistência interna da carga.

Para demonstrarmos isso, considere o circuito da Figura 9.1. Nele, estamos representando a impedância interna da fonte como sendo Z_i. Ele estará em série com qualquer carga colocada na saída da fonte.

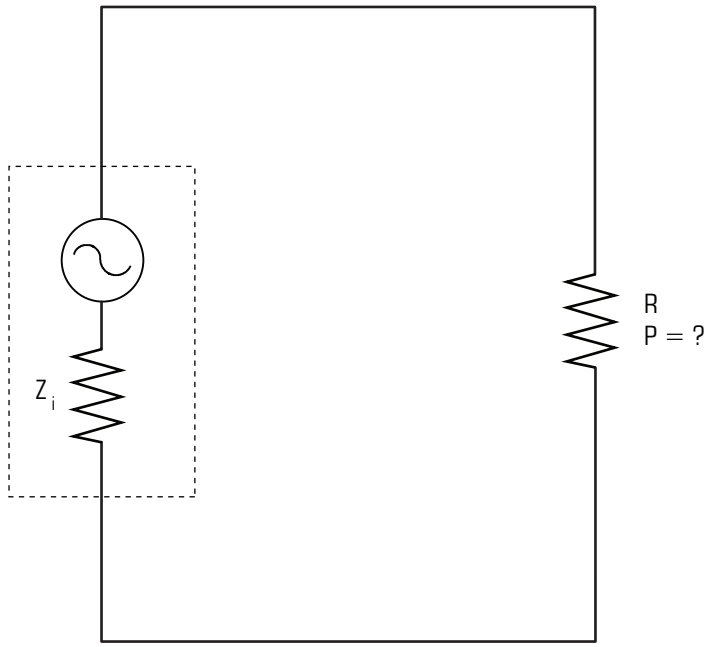


Figura 9.1: Impedância interna de uma fonte de alimentação.

Como vimos no capítulo passado, em circuitos de corrente contínua a impedância é igual à resistência total do circuito. Com isso, em fontes de alimentação de tensão contínua a impedância interna da fonte pode ser chamada "resistência interna".

Vamos supor que essa impedância interna seja de 0,05 Ω – valor que normalmente consideraríamos desprezível, por ser tão baixo; é por esse motivo que normalmente desprezamos o valor da impedância interna de uma fonte de alimentação. Vamos supor também uma fonte de 3 V. Vamos fazer o cálculo da potência máxima que a fonte é capaz de fornecer, para vários valores de R, que é a resistência da carga conectada à fonte de alimentação. Z_T é a impedância total do circuito, que será dada por $R + Z_i$, já que em nosso exemplo temos um circuito puramente resistivo (isto é, não colocamos capacitores e indutores conectados à fonte de alimentação). A corrente pode ser facilmente calculada pela fórmula $I = V / (R + Z_i)$. Já a potência sobre a carga R será $R \cdot I^2$.

Tabela 9.1: Demonstração da máxima transferência de potência.

Z_i (Ω)	R (Ω)	Z_T (Ω)	I (A)	P (W)
0,05	0,01	0,06	50,00	25
0,05	0,02	0,07	42,86	36,73
0,05	0,03	0,08	37,50	42,19
0,05	0,04	0,09	33,33	44,44
0,05	0,05	0,1	30,00	45,00
0,05	0,06	0,11	27,27	44,63
0,05	0,07	0,12	25,00	43,75
0,05	0,08	0,13	23,08	42,60
0,05	0,09	0,14	21,43	41,33
0,05	0,1	0,15	20,00	40,00
0,05	0,5	0,55	5,45	14,88
0,05	1	1,05	2,86	8,16

O que podemos concluir com esses cálculos? Repare que a potência máxima conseguida na carga foi de 45 W e essa potência só foi possível quando a impedância da carga possuiu o mesmo valor da impedância interna da fonte (0,05 Ω). Isso, portanto, demonstra o que afirmamos anteriormente: a máxima transferência de potência só ocorre quando a impedância fora da fonte é igual à impedância interna da fonte de alimentação.

Isso serve para entender o funcionamento de aparelhos de som e amplificadores de áudio de uma forma geral. Um amplificador de áudio é uma fonte de tensão alternada, já que o som é codificado como um sinal elétrico em forma de tensão alternada. Assim, você só conseguirá atingir o máximo de potência do seu aparelho de som quando a impedância da caixa de som for igual à impedância interna do amplificador. Esse "casamento" é justamente chamado *casamento de impedância*. Ou seja, quando há casamento de impedância, há a máxima transferência de potência.

Portanto, o que mais importa para amplificadores de áudio em relação às suas caixas de som é que, primeiro, elas suportem a potência máxima que o amplificador é capaz de gerar. E, segundo, haja o casamento de impedância para que seja transferido o máximo de potência que o amplificador é capaz de gerar.

Para um exemplo prático, vamos considerar um amplificador de áudio (um aparelho de som) com uma impedância de 4 Ω em suas saídas. Para obtermos a transferência máxima de potência, precisaremos ligar a esse amplificador uma caixa de som com uma impedância igualmente de 4 Ω. Se você ligar uma caixa de som com impedância de 8 Ω a esse amplificador, a caixa não

"queimará" nem o amplificador ficará "sobrecarregado"; o amplificador somente não será capaz de transmitir a potência máxima que é capaz de gerar para as caixas. Uma solução nesse caso é colocar duas caixas de som de 8 Ω conectadas em paralelo, já que a impedância resultante será de 4 Ω, casando com a impedância do amplificador (mesma fórmula usada para resistores).

Já que tocamos no assunto, uma questão interessante. Suponhamos que você tenha um amplificador com impedância de 4 Ω e possua uma caixa de som de 4 Ω conectada a ele e resolve dar uma festinha em casa. Aí, você acha melhor ligar mais caixas de som a ele. Supondo que esse amplificador não tenha saída para mais caixas, você foi e ligou uma caixa de som também de 4 Ω em paralelo com a caixa já existente. O som ficará melhor ou pior?

Por incrível que pareça, o som piorará. Apesar de agora você ter mais caixas de som e o som ser, portanto, distribuído por mais saídas de som, a impedância das caixas caiu pela metade (passando a ser de 2 Ω, duas caixas de 4 Ω em paralelo). Com isso, o amplificador não será capaz de transmitir o máximo de potência para as caixas de som, significando que, apesar de agora você ter mais caixas de som, a potência máxima que conseguirá atingir com o seu aparelho de som *será menor*.

Não é só com amplificadores de áudio que devemos prestar atenção no correto casamento de impedância. Com antenas a mesma coisa ocorre. Se não casarmos a impedância da antena com a impedância da entrada do sintonizador (rádio ou televisão), você não terá a maior transferência de potência possível, e o sinal captado não será o mais forte possível.

Unidades de Potência

Para calcularmos a potência de qualquer circuito, usamos a fórmula de potência diretamente ou suas derivações. No caso de circuitos de corrente alternada, os valores entrados na fórmula deverão ser os valores eficazes (RMS), que, como estudamos no Capítulo 5, é o valor equivalente da grandeza (tensão ou corrente) caso ela fosse contínua e não alternada. O valor eficaz mede o verdadeiro "poder" de qualquer sistema elétrico.

O mesmo ocorre em relação à potência. Todas as potências que estamos calculando ao longo do livro são potências eficazes (RMS), da mesma forma que, quando falamos em valores de tensão alternada, estamos nos referindo ao seu valor eficaz, a não ser quando explicitamente falamos "valor de pico" ou "valor de pico-a-pico".

No mercado de aparelhos de som e amplificadores de áudio de uma forma geral, desde a década de 1970, quando esse tipo de aparelho entrou na moda e houve uma verdadeira explosão nas suas vendas (especialmente por conta dos avanços da indústria eletrônica ocorridos naquela década), os fabricantes começaram a "maquiar" a verdadeira potência de seus aparelhos, de forma a ludibriar os consumidores.

A primeira maquiagem que foi feita em relação à potência de amplificadores foi somar o valor da potência máxima de cada canal do amplificador. Todos os aparelhos de som da década de 1960 para cá são estéreo, significando que possuem dois canais independentes de som, esquerdo e direito. Eletronicamente, o aparelho possui dois amplificadores independentes. Assim, em aparelhos de som com uma potência de 35 W RMS por canal, os fabricantes começaram a divulgar a potência do aparelho como sendo "35 W + 35 W" e, logo depois, "70 W" (e, em letras miúdas, "por canal" ou "potência máxima").

Logo depois, os fabricantes de aparelhos de som começaram a divulgar a potência máxima de seus aparelhos em uma unidade chamada IHF (Institute of High Fidelity), que informava a potência do aparelho não em watt eficaz (RMS), mas sim em potência de pico. Como estudamos anteriormente, o valor eficaz representa 70% do valor de pico de uma forma de onda alternada. Assim, os fabricantes conseguiram rapidamente "inflar" a potência informada de seus aparelhos em 30%. Só no papel, perceba, porque a potência real continuava a mesma. Assim, um amplificador de 35 W RMS poderia ser vendido como sendo de 50 W, 50 W + 50 W ou, ainda, 100 W. Em letras miúdas aparecia agora a expressão "IHF" ou "potência máxima de pico".

O pior começou a ocorrer na década de 1980, quando os fabricantes começaram a informar a potência máxima de seus aparelhos em uma unidade não padronizada chamada PMPO (Peak Music Power Output, mas que deveria significar mesmo Potência Média Para Otário). Como não é uma medida padronizada, cada fabricante pode definir o que é PMPO como bem entender, e potências PMPO divulgadas por um fabricante não podem ser comparadas com a potência divulgada por outro, já que a metodologia de como cada fabricante chega às suas potências PMPO é diferente. Muitos fabricantes chegam à potência PMPO simplesmente multiplicando a potência RMS por quatro.

Assim, o mesmo amplificador estéreo de 35 W RMS poderia ser vendido agora como sendo de 280 W PMPO (140 W por canal). Alguns fabricantes exageram ainda mais.

Se pegarmos um amplificador para home theater, a história fica ainda pior, porque esses amplificadores possuem pelo menos seis canais independentes, isto é, em vez de só terem os canais esquerdo e direito, possuem esquerdo dianteiro, esquerdo traseiro, direito dianteiro, direito traseiro, voz e subwoofer. Ou seja, dentro do amplificador, ele possui seis circuitos amplificadores independentes. Assim, um amplificador desses com uma potência real de 35 W RMS por canal pode ser facilmente vendido como tendo uma potência máxima de 210 W RMS (35 W · 6) ou 840 W PMPO (ou ainda mais, dependendo da falta de escrúpulo do fabricante).

Impressionante é a cara de pau dos fabricantes. O pior é que ninguém pode processá-los contra essa ludibriação, já que eles especificam, em letras miúdas e em lugar visível, que a potência informada é total e em PMPO e no manual sempre tem, na página de especificações técnicas (geralmente a última página do manual), a potência verdadeira do amplificador do aparelho.

Decibel

O *bel* (símbolo: B) é uma unidade usada para medirmos o *ganho* de um amplificador. O ganho de um amplificador é o quanto ele amplifica um sinal. Dessa forma, o ganho pode ser medido simplesmente dividindo a potência de saída pela potência de entrada. Por exemplo, um amplificador capaz de aumentar a potência de um sinal de 1 W para 10 W possui um ganho de 10.

Esta unidade pode ser usada para a medida de ganho de qualquer tipo (por exemplo, de antenas); estamos usando amplificadores como exemplo apenas por eles serem de entendimento mais fácil.

O ouvido humano consegue escutar sons em uma intensidade de 10^{-16} W/cm^2 até 10^{-4} W/cm^2. Com uma potência maior do que essa começamos a sentir dor. Ou seja, existe uma variação de 10^{12} níveis entre o som mais fraco e o som mais forte que o nosso ouvido consegue escutar. O mais comum para representarmos sons é usarmos uma escala logarítmica. A *escala logarítmica* permite que, em vez de usarmos uma escala com 10^{12} variações para representarmos as variações de som, essa escala seja "comprimida" em uma escala com apenas 12 variações.

Assim, um bel é definido como:

$$B = \text{Log}\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \tag{9.5}$$

Onde P_0 é a potência de referência (potência na entrada de um amplificador, por exemplo) e P_1 é a potência que você está comparando com a potência de referência (potência de saída de um amplificador, por exemplo).

Um decibel (abreviado dB) vale um décimo do bel, isto é, 10 decibéis equivalem a um bel. Assim, um decibel é definido como:

$$dB = 10\,\text{Log}\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \tag{9.6}$$

Por exemplo, um amplificador que consiga amplificar um sinal de 1 W para 30 W possui um ganho de 14,77 dB (a melhor maneira de se calcular um logaritmo é usando uma calculadora científica).

Repare que falamos em ganho, e decibel é apenas uma escala para medirmos ganho. Um amplificador com ganho 2, ou seja, um amplificador que aumente a potência de 1 W para 2 W, de 10 W para 20 W ou de 50 W para 100 W, não importa, terá um ganho de 3,01 dB.

O decibel também pode ser usado para medir ganho de tensão ou corrente. Nesse caso, desde que a impedância seja a mesma (impedância de entrada seja igual à de saída), basta substituir P por V^2 ou I^2 na fórmula apresentada, gerando a seguinte fórmula para ganho de tensão ou corrente:

$$dB = 10 Log \left(\frac{V_1^2}{V_0^2} \right) \quad (9.7)$$

Que é igual a:

$$dB = 20 Log \left(\frac{V_1}{V_0} \right) \quad (9.8)$$

Ou seja, o decibel é apenas uma escala logarítmica para medir ganho de qualquer tipo.

Pressão Sonora

O decibel é também muito usado na representação de pressão sonora (SPL, Sound Pressure Level), que é a medida de quanto um determinado ruído está mais alto do que um valor de referência. Na medida de pressão sonora usando o ar como meio, normalmente usa-se como valor de referência (V_0 nas fórmulas apresentadas acima) 20 μPa (micropascal: pascal é a unidade de medida de pressão do sistema internacional), que é considerado o valor mínimo que o ouvido humano é capaz de escutar a 1 kHz.

Por exemplo, uma britadeira a um metro de distância produz uma pressão sonora de 2 Pa, podendo ser representada como 100 dB SPL, resultado de 20 Log (2 Pa/20 μPa).

É interessante notar que a unidade de medida de pressão sonora chama-se SPL, mas, infelizmente, na maioria das vezes este é removido, dando-se a impressão errônea que dB é uma unidade de grandeza.

Aparelhos de medida de pressão sonora podem usar filtros para essa medição. O filtro mais usual chama-se "A", que melhor simula o ouvido humano. Medidas usando este filtro são representadas como db(A) ou dBA, gerando confusão para aqueles que não conhecem o tema.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a potência dissipada por R1 no circuito da Figura 9.2?

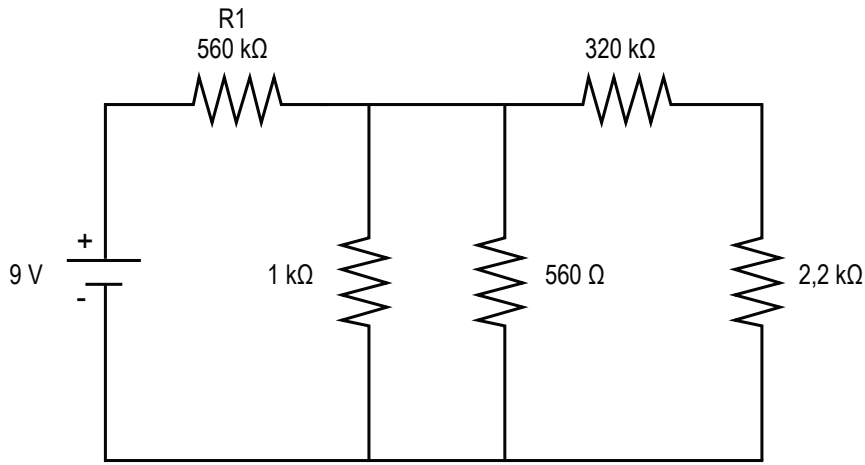


Figura 9.2: Qual é a potência dissipada por R1?

2. Qual é a corrente elétrica consumida por uma lâmpada incandescente de 60 W em uma rede elétrica de 127 V?
3. Se comprarmos uma lâmpada com valores nominais "100 W – 220 V" e a ligarmos em uma rede elétrica de 110 V, qual será a potência realmente dissipada por ela, considerando que sua resistência seja constante?
4. Temos um amplificador estéreo com impedância de 4 Ω por canal. Você vai dar uma festinha no próximo sábado à noite e juntou com a galera do seu prédio oito caixas de som de 4 Ω cada. Como essas caixas deverão ser ligadas de forma que você obtenha o máximo de potência que o seu aparelho de som é capaz de gerar?
5. Uma turbina de avião gera uma pressão sonora de 632 Pa quando estamos a 30 metros dela. Qual é o valor em decibel dessa pressão sonora?
6. Qual é o ganho, em decibel, de um amplificador capaz de aumentar um sinal de 0,5 Vp para 12 Vp?

Capítulo 10
Eletromagnetismo

Introdução

Enquanto o campo elétrico é gerado pela simples presença de cargas elétricas, o campo magnético é gerado pelo movimento de cargas elétricas. Como a corrente elétrica é exatamente isso – movimento de cargas elétricas –, é fácil concluir que uma corrente elétrica sempre gera um campo magnético.

Da mesma forma, o campo magnético não interfere em cargas elétricas que estão paradas, mas apenas em cargas elétricas em movimento.

Então, por que dois pedaços de ímã (chamados ímãs permanentes) se atraem ou repelem, se não há corrente elétrica passando por eles? A questão é que, em cada átomo, existem elétrons em movimento (ao redor do núcleo). Com isso, cada átomo gera um pequeno campo magnético. Nos materiais "comuns", esses minúsculos ímãs estão organizados aleatoriamente, e com isso o campo magnético total é nulo. Nos ímãs permanentes, esses pequenos ímãs estão parcialmente alinhados, o que faz com que eles gerem (e sofram a ação de) um campo magnético.

Um ímã sempre tem dois polos, chamados de norte e sul (a origem dessa nomenclatura vem da bússola, que é um ímã e se alinha com os polos de nosso planeta, que também é um gigantesco ímã).

Outro detalhe que diferencia o campo magnético do campo elétrico é que você pode ter cargas de apenas um sinal gerando campo elétrico, mas, no caso do campo magnético, um ímã vai sempre ter dois polos, e é impossível separá-los. Se você dividir um ímã em duas partes, cada uma delas terá um polo norte e um polo sul.

Através de uma experiência muito simples e interessante podemos descobrir e provar que todo condutor gera um campo magnético ao seu redor quando há uma corrente elétrica passando por ele. Essa experiência, ilustrada na Figura 10.1, consiste em colocar uma pequena bússola ao lado de um fio de um circuito. Quando há corrente passando por esse fio, o ponteiro da bússola move-se, provando que foi formado um campo magnético. Assim que a corrente elétrica do circuito é cortada, o ponteiro da bússola retorna à sua posição original.

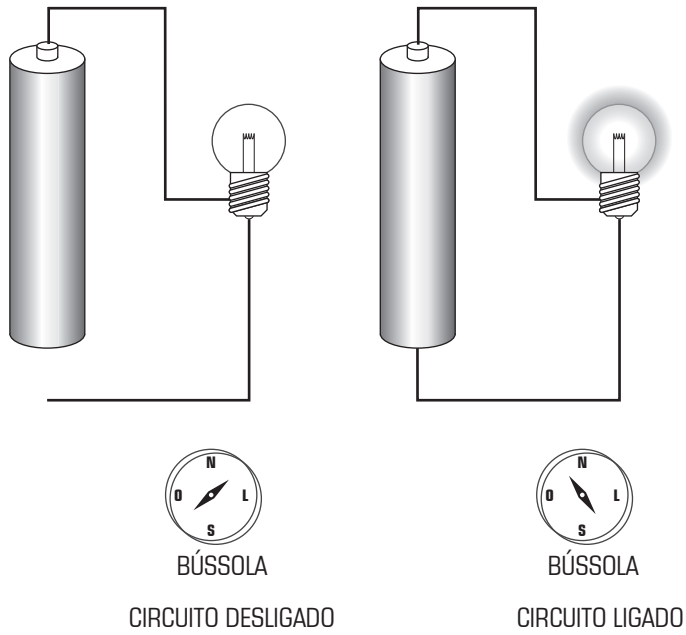


Figura 10.1: Campo magnético é formado quando o circuito está ligado.

Assim, chegamos à conclusão de que toda corrente elétrica cria um campo magnético ao redor de seu condutor. O inverso também é verdadeiro: se variarmos um campo magnético próximo a um condutor, podemos gerar corrente elétrica em um fio no qual originalmente não havia eletricidade nele. É assim que as turbinas de usinas de eletricidade conseguem gerar eletricidade: a água ou o vapor d'água movem uma bobina gigantesca que cria uma variação de campo magnético que, por sua vez, *induz* a formação de eletricidade. A palavra induz foi grifada de modo que você lembre que é por esse motivo que bobinas também são chamadas indutores.

Tradicionalmente é ensinado que o sentido desse campo magnético formado é dado pela *regra da mão direita*. Essa regra diz que o dedão da mão direita deve apontar para o sentido da corrente elétrica (sentido convencional), e os demais dedos automaticamente indicarão o sentido do campo magnético que é formado ao redor do condutor. Na Figura 10.2 mostramos a aplicação prática da regra da mão direita.

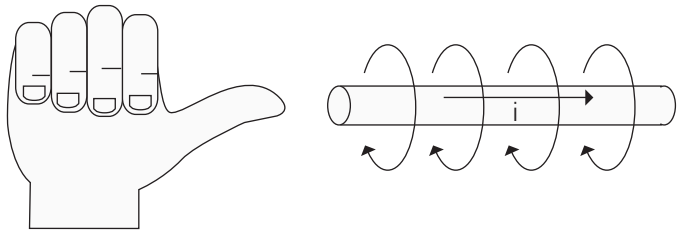


Figura 10.2: Regra da mão direita.

É importante entender que a regra da mão direita é baseada no sentido convencional da corrente elétrica. Se você quiser achar o sentido do campo magnético considerando o sentido eletrônico da corrente elétrica, deve utilizar a mão esquerda, e não a mão direita.

Uma bobina ou indutor é um fio enrolado várias vezes. Esse enrolamento faz com que o campo magnético gerado seja mais forte. Esse campo magnético também é chamado *eletromagnético*, já que temos campo elétrico e magnético ao mesmo tempo.

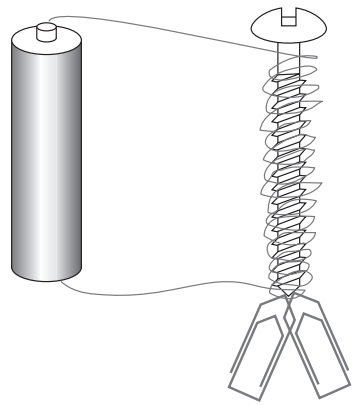


Figura 10.3: Um eletroímã.

Esse campo eletromagnético criará um eletroímã, que é um ímã elétrico. Você mesmo pode fazer essa experiência em casa. Pegue um parafuso e enrole um fio fino várias vezes ao seu redor. Ao ligar essa bobina em uma pilha, você conseguirá atrair pequenos objetos metálicos, tais como clipes de papel e grampos. Repare que, quando você cortar a eletricidade, os objetos metálicos deixarão de ser atraídos pela bobina.

A força do campo magnético criado também depende do *núcleo* da bobina. Bobinas sem nada em seu interior são bobinas com núcleo de ar. Por isso é que para a experiência do eletroímã falamos para você usar um parafuso: o parafuso provocará um campo eletromagnético maior, já que é composto de metal magnético (ferro, por exemplo). Os ímãs elementares presentes no interior do metal magnético orientar-se-ão na direção do campo magnético e, com isso, vão somar ao seu campo o campo gerado externamente, aumentando a intensidade do campo magnético total.

No Capítulo 8 estudamos aprofundadamente o efeito causado por indutores (bobinas) em circuitos. Vimos que, em circuito de tensão contínua, bobinas possuem resistência baixa, funcionando como um circuito fechado. Nessa ocasião, havíamos deixado de fora o fato de uma bobina em um circuito de tensão contínua criar um campo eletromagnético ao redor, funcionando como um eletroímã. Já em circuitos de corrente alternada, a bobina oferece uma oposição à passagem da corrente elétrica, chamada reatância indutiva. No Capítulo 8 oferecemos todos os cálculos necessários para esse tipo de circuito.

Há vários componentes eletrônicos que se baseiam no princípio do eletromagnetismo para funcionar. Vamos estudar dois deles neste capítulo, só para que você consiga visualizar, na prática, os conceitos que apresentamos. No Capítulo 16 você aprenderá sobre o galvanômetro, que é um instrumento de medida de corrente elétrica que também usa o princípio do eletromagnetismo para funcionar. E, no Capítulo 26, discutiremos os transformadores, que usam o princípio de indução.

Alto-Falantes

Os alto-falantes são um cone normalmente de papelão com uma bobina presa em sua ponta. Ao redor da bobina existe um ímã permanente. A bobina criará um campo eletromagnético ao seu redor quando houver passagem da corrente elétrica. Dependendo do sentido da corrente elétrica que circula, a bobina poderá ser atraída pelo ímã que está ao redor ou então ser repelida. Quando a bobina é atraída ou repelida, ela move o cone de papelão junto consigo, já que este está preso nela. Essa movimentação produz ruído – ou seja, som. É dessa forma que um alto-falante consegue converter eletricidade em som. Componentes capazes de transformar eletricidade em outra forma de energia são chamados de *transdutores*.

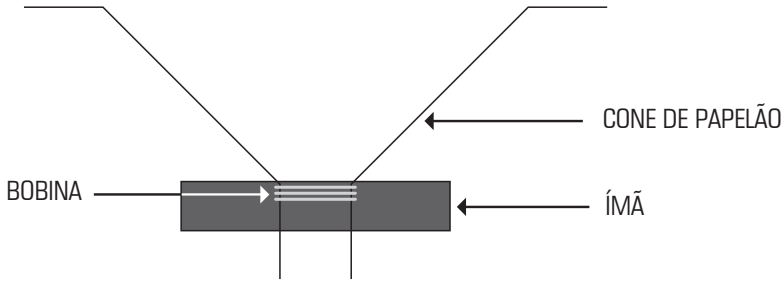


Figura 10.4: Funcionamento de um alto-falante.

A bobina do alto-falante possui uma resistência interna, conforme já havíamos antecipado no tópico *Máxima Transferência de Potência* do capítulo anterior. O quanto o alto-falante consegue converter de eletricidade em som é a sua potência. Todo alto-falante possui uma potência máxima admissível. Caso essa potência seja excedida, o alto-falante literalmente queima. Isso ocorre porque o fio que forma a bobina se rompe, já que a corrente que passa por este fio é maior do que a corrente máxima suportada por ele. Como discutimos anteriormente, a potência correta de se medir potência de alto-falantes é o watt RMS.

Alto-falantes podem ser classificados basicamente em três tipos: graves, médios e agudos (também chamados de woofers, mid-ranges e tweeters, respectivamente). Essa classificação diz respeito à faixa de frequência sonora que o alto falante é capaz de reproduzir com mais eficiência: sons graves (baixas frequências), sons médios (frequências médias, em especial a voz humana) e sons agudos (altas frequências). Os alto-falantes chamados subwoofers diferem-se dos woofers por reproduzirem somente a porção mais baixa do espectro (sons mais graves, de 20 Hz a 200 Hz), enquanto que o woofer consegue reproduzir sons em frequências mais altas do que essas (às vezes até 1 kHz).

Caixa de som é o nome que damos a uma caixa que abriga um ou mais alto-falantes. Uma caixa de som de boa qualidade terá três alto-falantes, um para cada faixa de frequência, permitindo que o espectro todo que o nosso ouvido é capaz de escutar seja reproduzido. Uma caixa de som com somente um único alto-falante possui uma faixa de frequência limitada, isto é, o alto-falante usado na caixa provavelmente não conseguirá reproduzir todas as frequências sonoras possíveis. Tipicamente esse tipo de alto-falante cortará os sons mais graves e os mais agudos.

A impedância de uma caixa de som é dada pela soma das resistências dos alto-falantes usados e das reatâncias dos capacitores e bobinas eventualmente usados como filtro (divisor de frequência). Em uma caixa de som com um só alto-falante de 8 Ω, obviamente a impedância dessa caixa será de 8 Ω. Já em uma caixa onde exista um woofer e um tweeter ligados em paralelo, e supondo que a impedância de cada um seja de 8 Ω, a impedância da caixa de som será de 4 Ω, supondo que não estamos usando filtros. Em uma caixa de som com mais de um alto-falante é necessário o uso de filtros para

separar a faixa de frequência que queremos que o alto-falante reproduza. Normalmente caixas de som usam filtros passivos, isto é, usando componentes que não necessitam de alimentação para funcionar, em particular capacitores e bobinas. Se esse tipo de filtro for usado, a impedância da caixa de som deve ser calculada como mostrado no Capítulo 8. No Capítulo 33 mostraremos como filtros usados em caixas de som são construídos.

Relés

Os relés (pronuncia-se "relês") são chaves eletromagnéticas. Eles possuem uma bobina que age como um eletroímã, fechando um circuito. Assim, um relé básico tem quatro terminais (fios): dois terminais para a bobina e dois terminais para a chave que é fechada quando há corrente elétrica circulando na bobina. No entanto, relés têm tipicamente uma chave de três contatos: NF, Normalmente Fechado; C, Comum; e NA, Normalmente Aberto. Quando o relé está desligado, há contato entre NF e C, NA ficando em aberto. Daí os nomes "normalmente fechado" e "normalmente aberto". Quando a bobina é acionada, há contato entre NA e C, e dessa vez é o NF que fica em aberto.

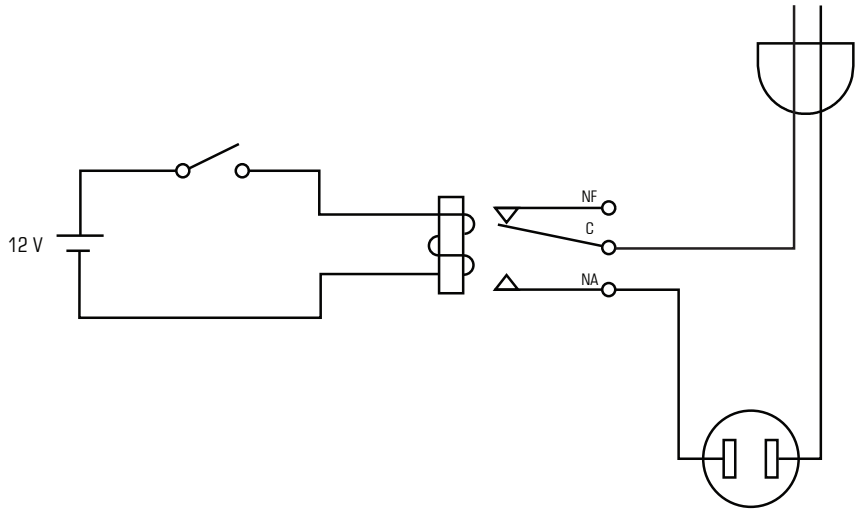


Figura 10.5: Relé.

A bobina do relé é classificada de acordo com a tensão em que ela aciona a chave. Por exemplo, em um relé de 12 V, é necessário 12 V na bobina para que ele feche a chave.

Como a chave é acionada magneticamente, é possível acionar um circuito elétrico totalmente diferente a partir de um circuito mais simples. Por exemplo, aplicando 12 V na bobina de um

relé de 12 V, podemos fazer com que um circuito elétrico de 127 V ou 220 V seja acionado. Damos esse exemplo na Figura 10.5: o relé é acionado com 12 V, fazendo com que uma tomada seja alimentada com a tensão da rede. A essa tomada poderíamos conectar qualquer aparelho elétrico CA, como uma lâmpada ou um eletrodoméstico, por exemplo. Os relés também têm como característica a corrente máxima que sua chave suporta.

◆◆◆

Exercícios

1. O que acontece se ligarmos um relé como mostrado na Figura 10.6?

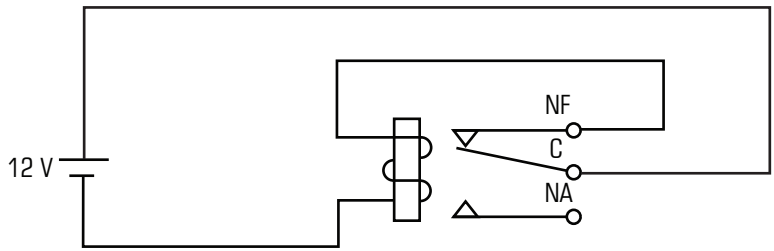


Figura 10.6: Qual será o comportamento deste circuito?

2. Qual é a impedância da caixa de som mostrada na Figura 10.7 a 1 kHz (equipamentos de áudio são normalmente calculados supondo uma frequência de 1 kHz)?

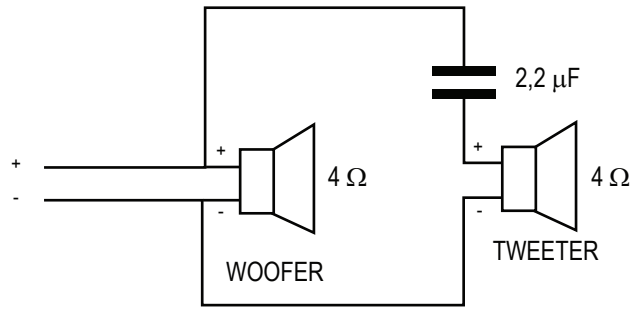


Figura 10.7: Qual é a impedância desta caixa de som?

Parte 3

Introdução à Análise de Circuitos Elétricos

Em princípio, os valores de qualquer corrente, tensão e resistência de um circuito podem ser facilmente calculados através da equação das correntes oriunda da Lei de Ohm. Entretanto, em alguns casos pode ser muito trabalhoso achar valores desconhecidos somente através desta equação. Nesta parte do livro apresentamos algumas ferramentas para simplificar esse tipo de cálculo.

Capítulo 11
Divisor de Tensão

Introdução

Nós podemos encontrar valores de tensão, corrente e resistência de um circuito através das equações oriundas da Lei de Ohm (4.2, 4.3 e 4.4). Acontece que, em circuitos maiores, o cálculo de muitos valores pode se tornar um tormento.

Neste capítulo apresentaremos uma fórmula muito prática para o cálculo de tensões sobre resistores instalados em série, chamada divisor de tensão.

Fórmula do Divisor de Tensão

Um circuito contendo componentes em série é um divisor de tensão: a corrente total do circuito é a mesma que passa em todos os componentes, e a tensão da fonte é dividida entre os componentes existentes.

Por exemplo, supondo o circuito da Figura 11.1, através da Lei das Malhas (Segunda Lei de Kirchhoff), temos que a soma das tensões existentes em cima de cada resistor será igual à tensão da fonte. Ou seja, $V_{CC} = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} + V_{R4}$.

Já a corrente que passa por cada resistor, no entanto, é a mesma, já que esses resistores estão em série. Esta corrente será a corrente total do circuito (I_T).

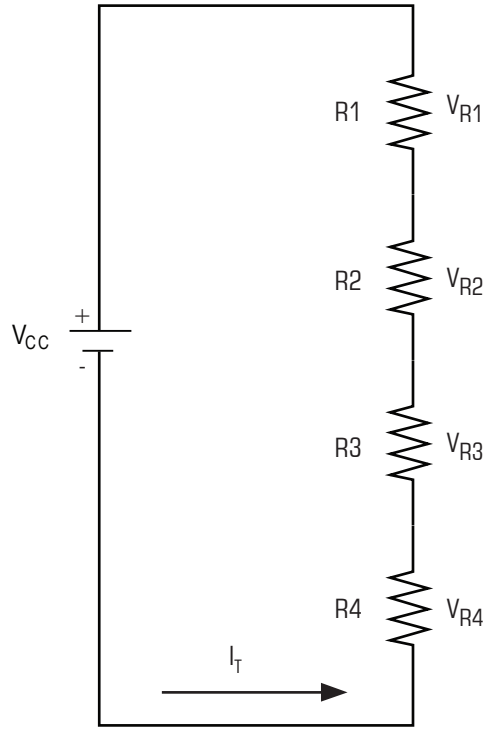


Figura 11.1: Circuito divisor de tensão.

Para descobrir a tensão aplicada em cima de qualquer um dos resistores, você pode utilizar diretamente a equação 4.3. Assim, a tensão sobre R1, por exemplo, será $V_{R1} = I_T \cdot R1$. A corrente total deste circuito será $I_T = V_{CC} / (R1 + R2 + R3 + R4)$. Substituindo I_T na primeira equação, chegamos à seguinte fórmula:

$$V_{R1} = \frac{R1 \cdot V_{CC}}{R_{TOTAL}} \qquad (11.1)$$

Essa fórmula, chamada divisor de tensão, pode ser usada para calcular a tensão sobre qualquer resistor em série, onde R1 obviamente você deverá substituir pelo valor do resistor cuja tensão aplicada sobre ele você quer descobrir. Ela é prática pois, como você pode observar, não há a necessidade de se calcular qualquer corrente.

◆◆◆

Capítulo 12
Divisor de Corrente

Introdução

Nós podemos encontrar valores de tensão, corrente e resistência de um circuito através das equações oriundas da Lei de Ohm (4.2, 4.3 e 4.4). Acontece que, em circuitos maiores, o cálculo de muitos valores pode se tornar um tormento.

Neste capítulo apresentaremos uma fórmula muito prática para o cálculo de correntes sobre resistores instalados em paralelo, chamada divisor de corrente.

Fórmula do Divisor de Corrente

Quando colocamos componentes em paralelo, a tensão em cima deles permanece a mesma, porém a corrente é dividida entre eles. Ou seja, temos um circuito divisor de corrente.

Na Figura 12.1, a corrente total do circuito foi dividida em quatro. Sabemos, pela Lei dos Nós (Primeira Lei de Kirchhoff) que $I_T = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} + I_{R4}$, mas a tensão sobre todos os resistores é igual à tensão da fonte de alimentação, já que eles estão em paralelo. Ou seja, $V_{CC} = V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = V_{R4}$.

Podemos descobrir o valor de cada corrente aplicando diretamente a equação 4.2. Por exemplo, $I_{R1} = V_{CC} / R1$.

Neste exemplo, esse cálculo é extremamente fácil. Entretanto, se o valor da fonte de alimentação não for dado ou se houver uma divisão de tensão que irá requerer cálculos para encontrar o valor da tensão sobre o resistor, a maneira mais simples será usando a fórmula do divisor de

corrente. Essa fórmula pode ser facilmente encontrada supondo dois resistores em paralelo, R1 e R2. Nesse caso, $V_{CC} = R_{TOTAL} \cdot I_T$, sendo $R_{TOTAL} = (R1 \cdot R2) / (R1 + R2)$. Substituindo V_{CC} na equação anterior, chegamos à fórmula abaixo.

$$I_{R1} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot I_T \qquad (12.1)$$

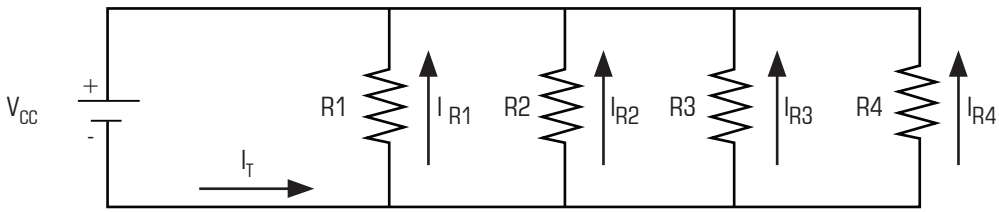


Figura 12.1: Divisor de corrente.

No caso de haver mais de dois resistores, como é o caso da Figura 12.1, então a fórmula correta é:

$$I_{R1} = \frac{\text{Soma dos outros resistores onde não passa } I_{R1} \text{ na malha}}{\text{Soma dos outros resistores da malha + R1}} \cdot I_T \qquad (12.2)$$

Essa soma, no entanto, deverá levar em consideração resistores em paralelo. Portanto, apesar de usarmos a palavra "soma", devemos efetuar o cálculo de resistências em paralelo:

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} + \ldots \qquad (12.3)$$

ou, para o caso de apenas dois resistores:

$$R_{TOTAL} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \qquad (12.4)$$

Para facilitar, daqui para frente iremos representar resistores em paralelo com o símbolo //. Assim, R1 // R2 significa que deverá ser aplicada a fórmula de resistores em paralelo (12.4) usando esses valores.

Para encontrarmos I_{R1} da Figura 12.1 usando essa fórmula, deveremos efetuar o cálculo da seguinte forma:

$$I_{R1} = \frac{R2 \,//\, R3 \,//\, R4}{(R2 \,//\, R3 \,//\, R4) + R1} \cdot I_T \qquad (12.5)$$

Para o circuito da Figura 12.1 essa fórmula é muito menos prática do que a equação das correntes ($I_{R1} = V_{CC} / R1$). Como dissemos, para circuitos mais complexos ou quando não soubermos o valor de V_{CC}, a fórmula do divisor de corrente pode ser uma "mão na roda".

Basta analisarmos o próximo exemplo (Figura 12.2). A fórmula para achar I_{R1} *é a mesma*. Quando dissemos "malha" na fórmula, você pode interpretar como "conjunto de resistores em paralelo".

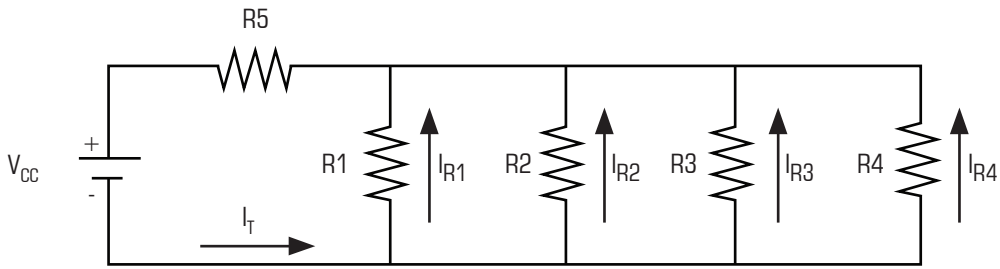


Figura 12.2: Circuito divisor de corrente e tensão.

Nesse caso, I_{R1} não será mais igual a V_{CC} / R_1, mas sim a $(V_{CC} - V_{R5}) / R1$. Se você estiver resolvendo um problema onde os valores das tensões não foram dados, essa fórmula pode realmente ajudar.

◆◆◆

Exercícios

1. Considerando o circuito da Figura 12.1, calcule I_{R4}, sabendo-se que R1 = 560 Ω, R2 = 780 Ω, R3 = 1 kΩ e R_4 = 820 Ω. O valor da fonte não é dado e sabemos que o circuito consome 100 mA.
2. Qual é a potência dissipada por R4?
3. Qual é a tensão da fonte?

Capítulo 13
Circuitos Delta e Estrela

Introdução

Existe uma situação realmente complicada de cálculo: são os circuitos em delta (também chamados π ou triângulo). Nesse tipo de circuito, os resistores estão dispostos como mostra a Figura 13.1.

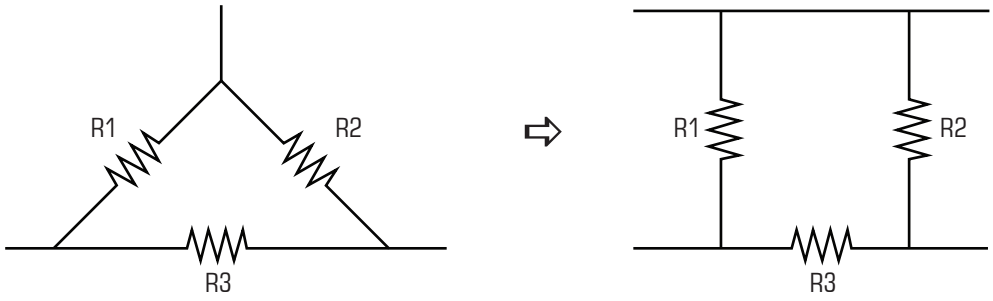


Figura 13.1: Circuito delta.

Como podemos calcular a resistência total desse circuito? É complicado, já que não há como aplicarmos as fórmulas tradicionais, pois os resistores não estão nem em série nem tampouco em paralelo!

Os circuitos delta podem ser convertidos por um circuito equivalente chamado estrela (também chamado T ou Y), a fim de descobrirmos a resistência total de um circuito. Essa conversão faz com que o valor total da resistência do circuito seja equivalente. Obviamente essa é uma conversão matemática, para efeitos de cálculo somente.

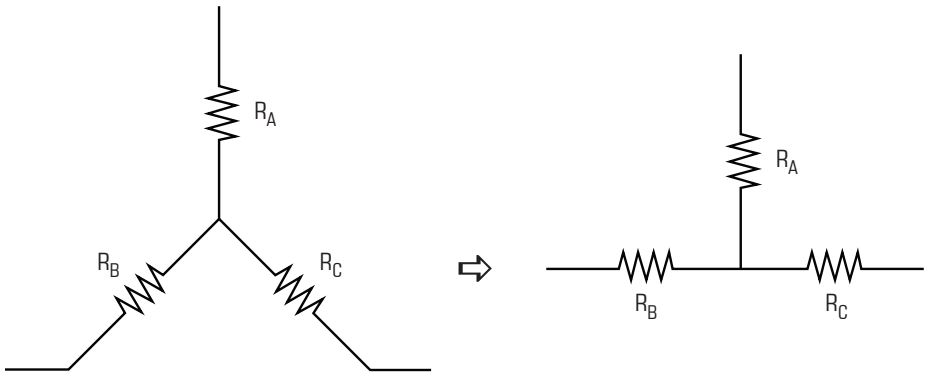


Figura 13.2: Circuito estrela.

Conversão de Circuito Delta em Estrela

A conversão do circuito delta em estrela é mostrada na Figura 13.3.

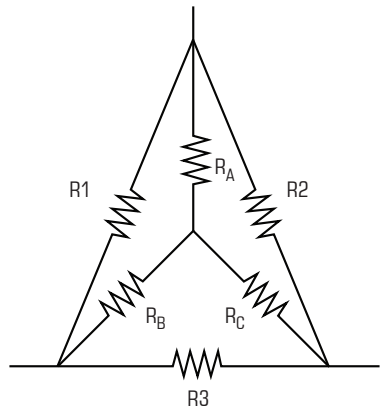


Figura 13.3: Conversão de circuito delta em estrela.

As fórmulas para a conversão dos resistores originalmente usados no circuito delta para os resistores do circuito equivalente em estrela são as seguintes:

$$R_A = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2 + R3} \quad (13.1)$$

$$R_B = \frac{R1 \cdot R3}{R1 + R2 + R3} \quad (13.2)$$

$$R_C = \frac{R2 \cdot R3}{R1 + R2 + R3} \quad (13.3)$$

Dessa forma, para calcularmos a resistência total do circuito da esquerda da Figura 13.4, teríamos de converter o circuito delta existente em estrela. O circuito passaria a ter o formato apresentado à direita. Os valores dos novos resistores (R_A, R_B e R_C) são calculados de acordo com as fórmulas acima. Como você pode reparar, no novo circuito RB e R5 estão em série, assim como R_C e R6. A resistência total do circuito pode ser agora facilmente calculada. Para esse circuito em particular ela será: R1 + R_A + [(R_B + R5) // (R_C + R6)].

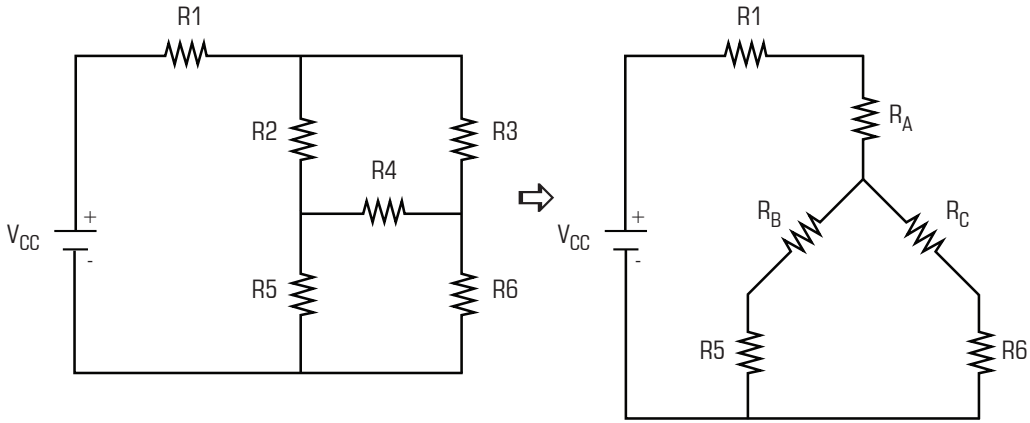


Figura 13.4: Exemplo de conversão de um circuito delta em estrela.

◆◆◆

Exercícios

1. Com base no circuito da esquerda da Figura 13.4, considere que R1 = 1 kΩ, R2 = 560 Ω, R3 = 820 Ω, R4 = 2,2 kΩ, R5 = 470 Ω e R6 = 320 Ω. Calcule a resistência total (resistência equivalente) deste circuito.
2. Qual é a corrente consumida por R1, supondo uma fonte de alimentação de 24 V?
3. Qual é a potência dissipada pelo circuito, considerando uma fonte de alimentação de 24 V?
4. Considerando o mesmo circuito (isto é, fonte de 24 V), qual é o valor da corrente que circula por R5?

Capítulo 14
Teorema de Thévenin

Introdução

O Teorema de Thévenin (pronuncia-se “têvênã”) é uma ferramenta para o cálculo de correntes aplicadas em cima de um determinado componente de um circuito. Através desse teorema, convertemos um circuito complexo em um circuito simples, contendo apenas uma fonte de alimentação (V_{TH}), um resistor equivalente (R_{TH}) e o resistor cuja corrente que passa por ele desejamos saber.

Para que essa ideia fique mais clara, observe a Figura 14.1. Nela convertemos o circuito da esquerda em um circuito equivalente usando o Teorema de Thévenin. R_X é o componente do circuito original cuja tensão e corrente aplicadas sobre ele desejamos saber. Por exemplo, se quisermos saber a corrente que passa em R3, R_X será R3.

Repare que demos um exemplo simples. A importância desse teorema fica mais clara quando temos um circuito complexo, com vários resistores e várias fontes de alimentação. Todo o circuito será substituído por um circuito simples (o circuito equivalente de Thévenin, à direita na Figura 14.1), tornando muito mais simples todo cálculo da corrente aplicada sobre um determinado componente do circuito sendo analisado.

Com o tempo, você verá que há determinados tipos de circuito que são mais fáceis de serem resolvidos usando o Teorema de Thévenin, enquanto que outros tipos são mais fáceis de serem resolvidos usando o Teorema de Norton, que apresentaremos no próximo capítulo. Em

geral, quando R_X está em série com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Norton e, quando R_X está em paralelo com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Thévenin.

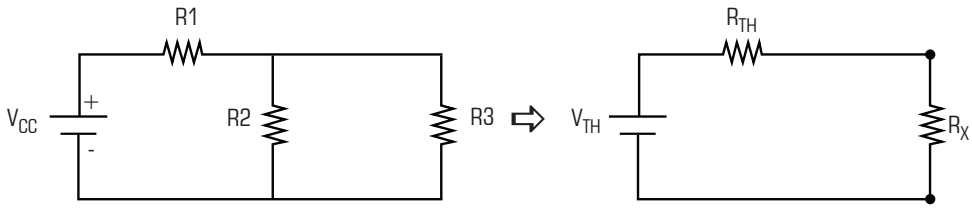


Figura 14.1: Circuito equivalente de Thévenin.

Calculando V_{TH}

Marcamos como A e B os pontos onde o componente cuja corrente queremos descobrir são conectados ao circuito. V_{TH} será igual à diferença de potencial existente entre A e B, removendo-se o componente do circuito.

No circuito da Figura 14.1, se quisermos descobrir a corrente que passa por R3, os pontos A e B serão os pontos do circuito que ficarão "abertos" ao removermos R3 do circuito, como mostramos na Figura 14.2. V_{TH} será igual à diferença de potencial existente entre A e B. Nesse exemplo específico, V_{TH} será igual a V_{R2}, já que R2 e R3 estão em paralelo. Note que em outros circuitos pode ser que a diferença de potencial entre A e B seja calculada de outra forma: o cálculo vai depender do circuito.

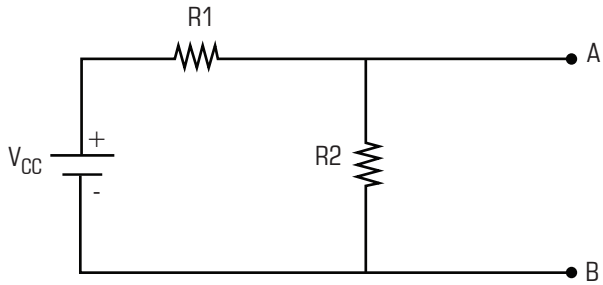


Figura 14.2: Calculando V_{TH}.

Nesse exemplo simples, como V_{TH} é igual a V_{R2}, podemos descobrir o seu valor usando a fórmula de divisor de tensão. Neste caso, V_{TH} será:

$$V_{TH} = V_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot V_{CC} \quad (14.1)$$

Calculando R_{TH}

O cálculo de R_{TH} é extremamente simples. Basta calcular a resistência entre os pontos A e B do circuito como se a fonte de alimentação estivesse em curto, isto é, removendo-se a fonte de alimentação do circuito e substituindo-a por um fio. Assim, para o circuito apresentado na Figura 14.1 onde queremos calcular a corrente que passa por R3, R_{TH} é calculado como mostra a Figura 14.3.

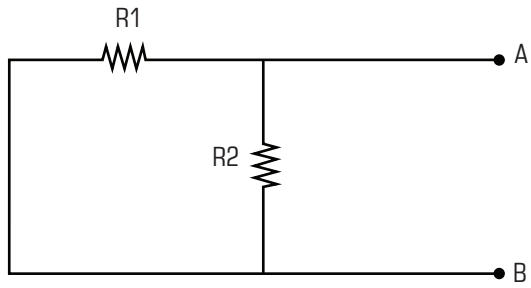


Figura 14.3: Calculando R_{TH}.

Neste caso, R_{TH} será R1 em paralelo com R2. Assim como ocorre com o cálculo de V_{TH}, o cálculo de R_{TH} dependerá do circuito.

Calculando a Corrente em R_X

A corrente que passa por R_X – que é o principal propósito do Teorema de Thévenin – será dada diretamente pela equação das correntes (4.2):

$$I_{RX} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_X} \quad (14.2)$$

Convertendo Thévenin em Norton

No próximo capítulo nós estudaremos o Teorema de Norton. Esse teorema é similar ao Teorema de Thévenin, trabalhando com a ideia de um circuito equivalente. Se você quiser converter o circuito equivalente de Thévenin em um circuito equivalente de Norton, basta colocar R_{TH} em paralelo e não mais em série, e substituir a fonte V_{TH} por um gerador de corrente chamado I_N (Ver Figura 14.4). O valor desse gerador de corrente será dado por:

$$I_N = \frac{V_{TH}}{R_{TH}} \qquad (14.3)$$

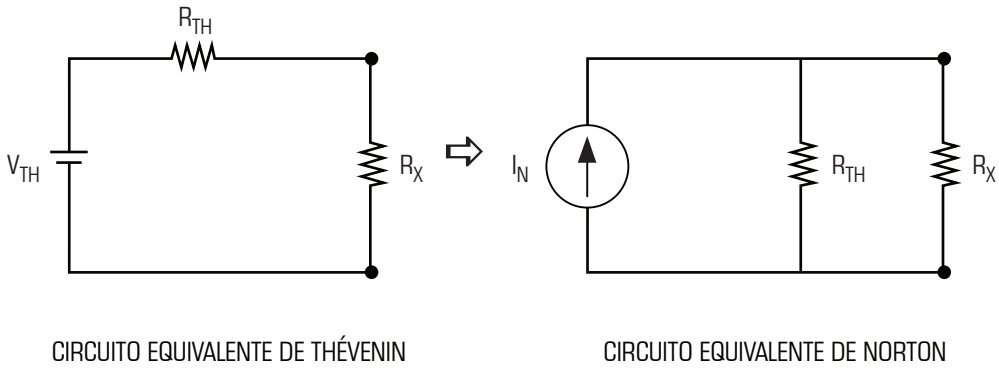


Figura 14.4: Convertendo Thévenin em Norton.

◆◆◆

Exercícios

1. Converta o circuito da Figura 14.1 em um circuito equivalente de Thévenin, considerando que R1 = 560 Ω, R2 = 1 kΩ, R3 = 2,2 kΩ e V_{CC} = 6 V, e que R_X é R3.
2. Calcule a corrente que passa por R3.

Capítulo 15
Teorema de Norton

Introdução

O Teorema de Norton segue a mesma ideia do Teorema de Thévenin: a conversão de um circuito complexo em um circuito simples para facilitar o cálculo da corrente que passa em um determinado componente.

Você verá que há circuitos que são mais fáceis de serem convertidos em Thévenin e outros, em Norton. Em geral, quando R_X está em série com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Norton e, quando R_X está em paralelo com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Thévenin.

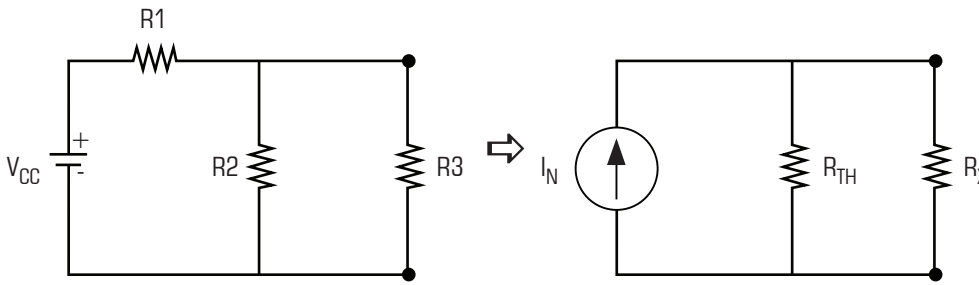


Figura 15.1: Circuito equivalente de Norton.

No caso do circuito equivalente do Norton, o resistor equivalente R_{TH} é o mesmo do Teorema de Thévenin, e deve ser calculado da maneira explicada no capítulo passado. A diferença é que ele agora é colocado em paralelo com R_X e não mais em série.

Calculando I_N

O circuito equivalente de Norton utiliza um gerador de corrente, chamado I_N. Obviamente esse gerador de corrente é um modelo teórico, já que na prática esse componente não existe. Assim como uma fonte de tensão fornece uma tensão fixa para o circuito, um gerador de corrente fornece uma corrente fixa para o circuito.

Essa corrente I_N é corrente que passa pelos pontos A e B quando é dado um curto-circuito entre esses pontos, isto é, dando um curto nos terminais do componente cuja corrente queremos calcular.

Usando o circuito da Figura 15.1, queremos montar um circuito equivalente de Norton para acharmos a corrente que passa em R3. Nesse caso, damos um curto entre os pontos A e B. A corrente que passará nesse caso pelos pontos A e B será dada diretamente pela equação das correntes (4.2) (I = V / R), onde $I_N = V_{CC} / R1$. Isso ocorre porque o circuito será resumido somente ao resistor R1, como vemos na Figura 15.2 (R2 ficará "inoperante", isto é, não passará corrente alguma em R2, já que a corrente elétrica tem preferência por passar onde não haja resistência elétrica).

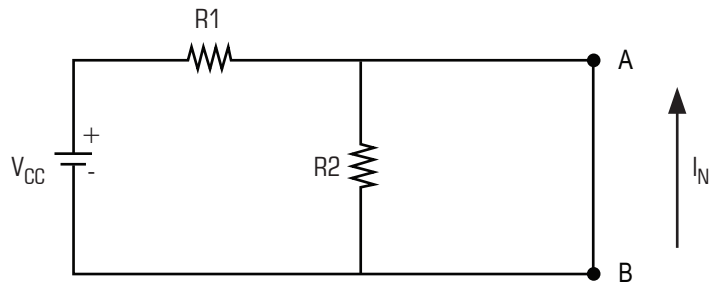


Figura 15.2: Calculando I_N.

Note que nesse caso aplicamos simplesmente a equação das correntes (4.2) (I = V / R) para descobrir I_N porque neste exemplo o circuito ficou resumido somente a R1, fazendo com que I_N fosse igual à corrente total do circuito. Em circuitos maiores, possivelmente a corrente que passa pelos pontos A e B quando estes estão em curto poderá não ser a corrente total do circuito. Neste caso, você terá de calcular a corrente total do circuito (e, para isso, terá de descobrir a re-

sistência total do circuito para quando os pontos A e B estão em curto), aplicando, em seguida, a fórmula do divisor de corrente para descobrir a corrente que passa pelos pontos A e B.

Para que essa ideia fique mais clara, considere o próximo circuito, onde queremos transformar o circuito em um equivalente Norton com R4 sendo R_X.

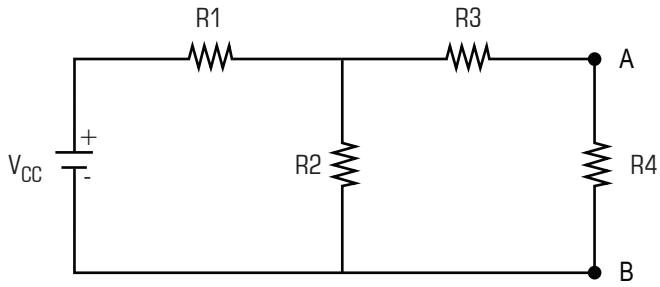


Figura 15.3: Exemplo para conversão.

Neste caso, I_N não será igual à corrente total do circuito: I_N será igual à corrente que passa por R3. Para acharmos essa corrente, podemos aplicar a fórmula de divisão de corrente. Para isso, precisaremos achar a corrente total do circuito quando os pontos A e B estão em curto, que será igual a $V_{CC} / [R1 + (R2 // R3)]$. Com isso, basta aplicar a fórmula de divisão de corrente, que para esse caso será $I_N = [R2 / (R2 + R3)] \cdot I_T$.

É claro que há outras maneiras de se chegar ao mesmo resultado. Poderíamos achar I_N aplicando a fórmula de divisor de tensão. Como quando os pontos A e B estão em curto $I_N = I_{R3}$, então sabemos que $I_N = V_{R3} / R3$. A tensão sobre R3 pode ser descoberta através da fórmula de divisor de tensão, que será igual a $(R3 \cdot V_{CC}) / [R1 + (R2 // R3)]$.

Com o tempo, você verá que há determinados tipos de circuito que são mais fáceis de serem resolvidos usando o Teorema de Thévenin, enquanto que outros tipos são mais fáceis de serem resolvidos usando o Teorema de Norton. Veremos um exemplo prático no exercício 2.

Calculando a Corrente em R_X

Com o circuito equivalente de Norton calculado, a corrente em R_X é facilmente calculada usando a fórmula do divisor de corrente:

$$I_{RX} = \frac{R_{TH}}{R_{TH} + R_X} \cdot I_N \qquad (15.1)$$

Você pode estar se perguntando por que calcular um circuito equivalente Norton, se no final das contas foi usada a fórmula do divisor de corrente. Não podemos nos esquecer de que em nosso exemplo mostramos um circuito simples. A grande vantagem do Teorema de Norton é a aplicação em circuitos grandes e complexos.

Convertendo Norton em Thévenin

Se você quiser converter o circuito equivalente Norton em um circuito equivalente Thévenin, basta substituir a fonte de corrente por uma fonte de tensão e colocar R_{TH} em série e não mais em paralelo (ver Figura 15.4). O valor de V_{TH} será dado por:

$$V_{TH} = R_{TH} \cdot I_N \qquad (15.2)$$

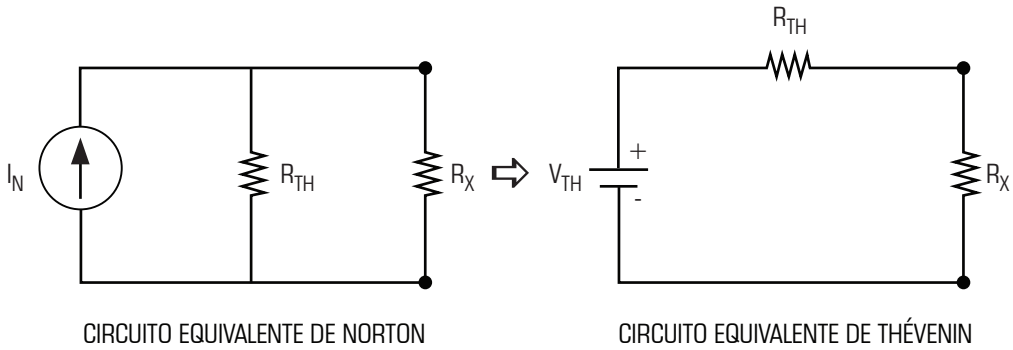


Figura 15.4: Convertendo Norton em Thévenin.

◆◆◆

Exercícios

1. Transforme o circuito da Figura 15.5 em um circuito equivalente de Norton, onde queremos descobrir a corrente que passa em R5.

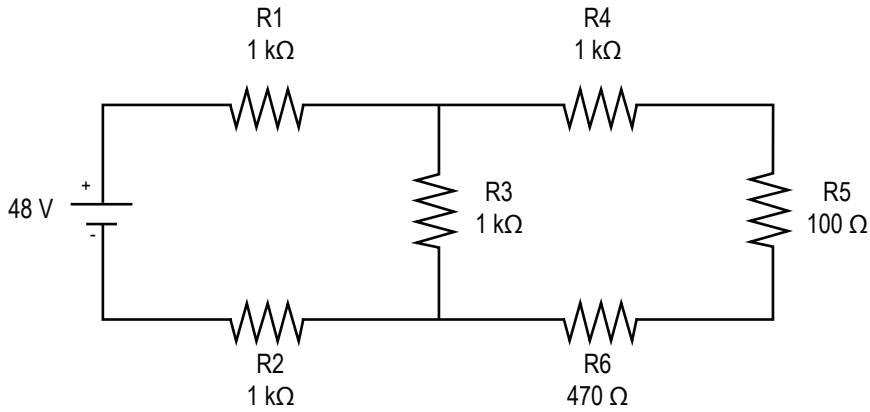


Figura 15.5: Converta este circuito em um equivalente de Norton.

2. Experimente converter o circuito da Figura 15.5 em um circuito equivalente de Thévenin como explicado no capítulo passado, sem usar os valores já descobertos no exercício anterior.

Parte 4
Medidas Elétricas

Nesta parte do livro você aprenderá como grandezas elétricas como a tensão, a corrente e a resistência podem ser medidas através da criação de instrumentos de medida, e aprenderá a utilizar instrumentos comerciais para a medida dessas grandezas, tais como multímetros e osciloscópios.

Capítulo 16
Galvanômetro

Introdução

O galvanômetro é o componente básico usado por qualquer instrumento de medida analógico. Ele consiste de um ponteiro que move de acordo com a intensidade da corrente elétrica que passa por ele.

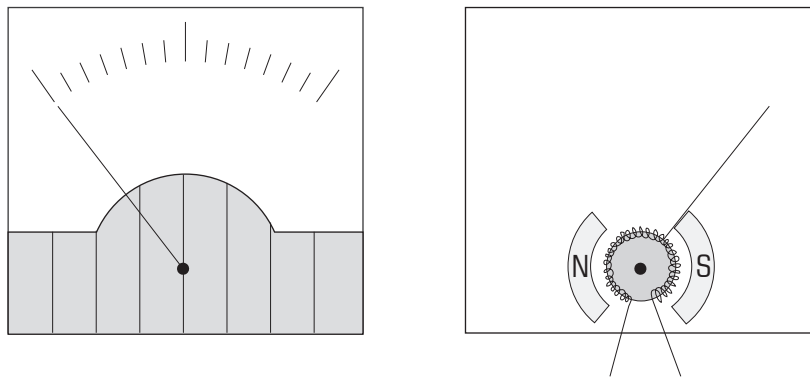


Figura 16.1: Galvanômetro.

Funcionamento

O galvanômetro é uma bobina móvel com dois ímãs permanentes ao seu lado. Quando uma corrente elétrica passa pela bobina do galvanômetro, é criado um campo eletromagnético ao redor, que fará com que a bobina seja normalmente repelida, pois é criado um campo magnético norte perto do ímã permanente com campo norte e um campo magnético sul perto do ímã permanente com campo sul. Como a bobina é móvel, isto é, ela gira em torno de seu próprio eixo, ela move. Como um ponteiro é preso na bobina, esse ponteiro move-se junto com ela.

Essa bobina possui uma resistência e uma corrente máxima admissível. Essa corrente máxima é também chamada *corrente de fundo de escala* – pois é a corrente que é necessária para fazer com que o ponteiro chegue até o final da escala do galvanômetro.

Se aplicarmos uma corrente menor do que a corrente de fundo de escala, a bobina irá se deslocar menos, fazendo com que o ponteiro fique em um ponto intermediário de sua escala.

O interessante é que o ponteiro ficará parado em um local de proporção exata em relação à corrente de fundo de escala. Por exemplo, se a corrente de fundo de escala de um determinado galvanômetro for de 10 mA e for aplicado somente 5 mA, o ponteiro ficará exatamente no meio da escala. Se for aplicada uma corrente de 3,33 mA, o ponteiro ficará exatamente no primeiro 1/3 da escala.

A bobina do galvanômetro possui polaridade. Se em sua posição de repouso (isto é, quando nenhuma corrente passa por ele) o galvanômetro fica no início da escala, como mostra a Figura 16.1, ao invertermos a sua polaridade, inverteremos a maneira com que o campo eletromagnético é formado ao redor da bobina, fazendo com que o ponteiro tente ir para "antes" da escala, isto é, ele ficará batendo no início da escala.

Existem galvanômetros cujo ponteiro, na posição de repouso, fica exatamente no meio da escala. Assim, seu ponteiro pode se mover tanto da esquerda para a direita quanto da direita para a esquerda, dependendo da polaridade que é aplicada sobre seus terminais.

Galvanômetros têm dois parâmetros que precisamos saber para podermos construir instrumentos de medida: a sua corrente de fundo de escala (corrente máxima) e a sua resistência interna. Alguns galvanômetros são comercializados de acordo com a sua sensibilidade, dada em V/Ω, em vez de sua corrente de fundo de escala. Neste caso você pode descobrir a corrente de fundo de escala invertendo a sensibilidade (função rotulada em calculadoras científicas como x^{-1}, isto é, dividindo um pelo valor da sensibilidade).

Simbologia

Em diagramas esquemáticos, galvanômetros podem ser representados nos formatos apresentados na Figura 16.2. O símbolo com letra A também representa um amperímetro – o galvanômetro é um amperímetro, já que ele mede a corrente elétrica passando por ele.

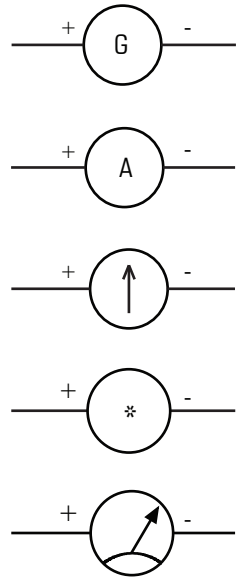


Figura 16.2: Simbologia do galvanômetro.

◆◆◆

Capítulo 17
Ponte de Wheatstone

Introdução

A Ponte de Wheatstone é um circuito clássico que pode ser utilizado para medir a resistência elétrica de um componente. Como um galvanômetro mede somente corrente, medir resistência não é tão fácil.

Funcionamento

O circuito clássico da Ponte de Wheatstone é apresentado na Figura 17.1. Quando R1 · R4 = R2 · R3, então a corrente que passa pelo galvanômetro é igual a zero.

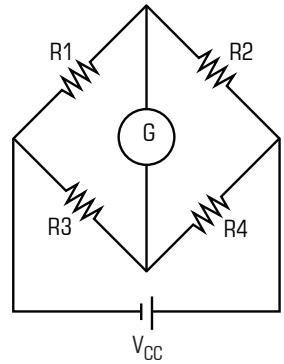


Figura 17.1: Ponte de Wheatstone.

Essa característica pode ser usada para descobrirmos o valor de um resistor desconhecido, como vemos na Figura 17.2. O valor de R_X, o resistor cujo valor queremos descobrir, será determinado pela fórmula:

$$R_X = \frac{R2 \cdot R3}{R1} \qquad (17.1)$$

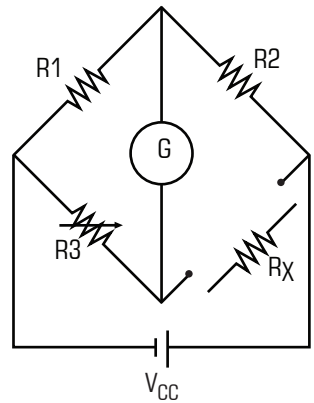


Figura 17.2: Descobrindo o valor de um resistor desconhecido usando a Ponte de Wheatstone.

Para descobrir o valor de um resistor desconhecido usando a Ponte de Wheatstone, devemos ajustar o valor de R3, que é um resistor variável, até o galvanômetro marcar zero. Quando isso ocorrer, basta aplicar a fórmula dada para descobrirmos o valor de R_X.

Resistores variáveis são também chamadas *reostatos* ou *potenciômetros*. Um potenciômetro possui um botão que giramos para variar a resistência encontrada em seus terminais. Ele possui uma resistência máxima (por exemplo, 10 kΩ), que é atingida quando o botão está totalmente girado para a direita. Assim, a resistência desse componente varia de zero ao seu valor máximo. A resistência encontrada em seus terminais dependerá, portanto, da posição de seu botão.

Se usarmos um potenciômetro na Ponte de Wheatstone teremos um problema: qual é o valor da resistência encontrada nos terminais do potenciômetro no momento em que o circuito atingir o equilíbrio? Ou seja, complicaríamos mais ainda a situação, pois teríamos dois resistores cujo valor não sabemos.

Assim, nesse tipo de circuito normalmente utilizamos uma *década* para formar o resistor variável (R3 da Figura 17.2). Uma década é uma caixa contendo vários resistores de valores conhecidos. Ao contrário do potenciômetro, em que sabemos somente o valor inicial (zero) e o valor final (valor estampado no corpo do potenciômetro), na década sabemos o valor exato da resistência encontrada em seus terminais, por causa da existência de várias chaves ou botões selecionando o valor da resistência. Uma década poderia ter um botão giratório para selecionar vários valores, como 100 Ω, 200 Ω, 300 Ω, etc.

Ao girar o botão da década e encontrarmos o equilíbrio na Ponte de Wheatstone, basta aplicar a fórmula usando o valor indicado na década para R3 de forma a encontrarmos o valor do componente desconhecido (R_X).

Um detalhe muito interessante é que, como a Ponte de Wheatstone atinge o seu equilíbrio quando a corrente que passa pelo galvanômetro é zero, isto significa que *qualquer* galvanômetro pode ser usado na Ponte de Wheatsone, independentemente de sua corrente máxima suportada (corrente de fundo de escala), já que nosso objetivo é ler uma corrente igual a zero.

◆◆◆

Capítulo 18
Amperímetro

Introdução

Amperímetro é o nome dado ao instrumento de medida de corrente elétrica. Em muitos casos você precisará medir a corrente que passa em um determinado ponto de um circuito e, para isso, precisará usar um amperímetro. Neste capítulo mostraremos como um amperímetro é construído e como usar uma ferramenta deste tipo.

Como Construir um Amperímetro

Vimos no Capítulo 16 que um galvanômetro é um amperímetro. Vimos também que ele possui duas características: resistência da bobina e corrente máxima suportada, também chamada corrente de fundo de escala – que é a corrente mínima necessária para que o ponteiro do galvanômetro atinja o final de sua escala.

Dessa forma, podemos usar um galvanômetro para medir uma corrente diretamente. Supondo um galvanômetro com uma escala marcada de 1 a 10 e uma corrente de fundo de escala de 10 mA, então cada ponto na escala equivale a 1 mA. Tudo muito simples e rápido.

A corrente de fundo de escala de um galvanômetro, caso não seja dada, pode ser descoberta através de um parâmetro chamado sensibilidade, bastando, para isso, inverter o valor da sensibilidade (botão x^{-1} em calculadoras científicas) para obter a corrente de fundo de escala. Explicaremos mais sobre sensibilidade no próximo capítulo.

O problema ocorre, no entanto, quando queremos medir uma corrente maior do que a corrente máxima do galvanômetro. Nesse caso, podemos fazer um divisor de corrente como mostra a Figura 18.1. Essa técnica é também conhecida como *shunt*.

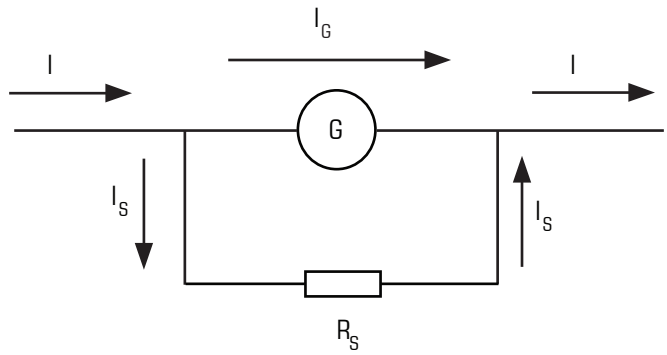


Figura 18.1: Construindo um amperímetro.

A ideia é converter a escala do galvanômetro para outra escala. Por exemplo, vamos supor que queira "transformar" um galvanômetro de 10 mA em um amperímetro capaz de medir correntes de até 1 A. A ideia é fazer com que, quando o ponteiro atinja o final da escala, ele passe a indicar 1 A e não mais 10 mA. Ou seja, fazer com que, em um galvanômetro com uma escala de 1 a 10, cada ponto valha 100 mA – ou seja, queremos multiplicar a escala por cem.

Para isso, é só fazer com que, quando a corrente I for igual a 1 A, passe no galvanômetro 10 mA (I_G = 10 mA) e o restante (990 mA) passe pelo resistor que foi colocado em paralelo (R_S).

Primeiro devemos calcular a tensão que é necessária ser aplicada ao galvanômetro para que ele indique sua corrente máxima. Ou seja, usando-se a equação derivada da Lei de Ohm (4.3), temos o seguinte:

$$V = R \cdot I \tag{18.1}$$

Logo:

$$V_G = R_G \cdot I_G \tag{18.2}$$

Como o galvanômetro e o resistor de shunt estão em paralelo, a tensão sobre o resistor de shunt e o galvanômetro terão o mesmo valor. Assim, podemos calcular o valor deste resistor da seguinte forma, novamente usando-se a equação derivada da Lei de Ohm (4.4):

$$R = \frac{V}{I} \tag{18.3}$$

Logo:

$$R_S = \frac{V_G}{I_S} \tag{18.4}$$

Substituindo o valor de VG pelo o valor encontrado anteriormente, temos:

$$R_S = R_G \cdot \frac{I_G}{I_S} \tag{18.5}$$

Para o nosso exemplo, se a resistência do galvanômetro fosse de 500 Ω, então R_S deveria ser igual a 5,05 Ω.

O grande problema na transformação de escala é que, caso a corrente que passe pelo amperímetro seja muito inferior à "nova" corrente de fundo de escala do amperímetro, o ponteiro irá mover-se muito pouco, impedindo a leitura do valor correto da corrente elétrica. Por exemplo, nesse amperímetro que construímos de 1 A, vimos que cada ponto da escala (supondo uma escala de 1 a 10) indicará 100 mA. Caso passe uma corrente de apenas 10 mA pelo amperímetro, o ponteiro ficará praticamente parado.

Por esse motivo, os amperímetros comerciais possuem várias escalas. Uma chave é responsável por selecionar qual será a corrente de fundo de escala. O que essa chave faz, na realidade, é selecionar qual resistor será colocado em paralelo com o galvanômetro, como ilustramos na Figura 18.2.

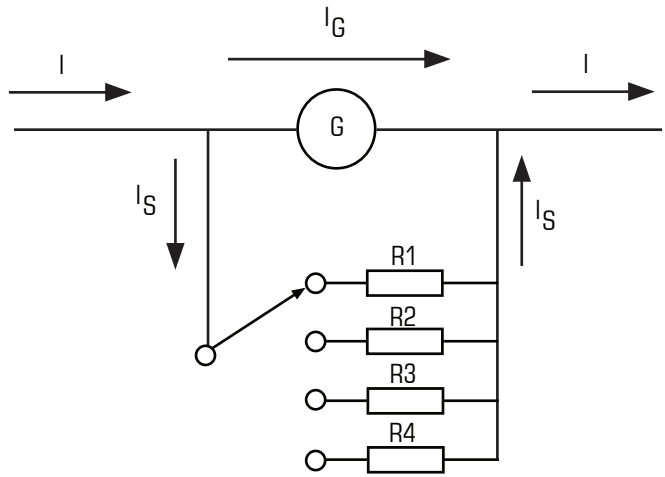


Figura 18.2: Seleção de escala de um amperímetro.

Continuando com o nosso exemplo, vamos construir agora um amperímetro que possua quatro escalas, como mostra a Figura 18.2. Supondo um galvanômetro de resistência interna de 1 Ω e corrente de fundo de escala de 10 mA, qual deveriam ser os valores dos resistores para que a chave selecionasse as seguintes correntes de fundo de escala: 10 mA, 100 mA, 500 mA e 1 A?

Se você parar para pensar, a escala de 10 mA é igual à corrente de fundo de escala do galvanômetro utilizado. Assim, com a chave nessa primeira posição, ela teria de simplesmente desativar o resistor colocado em paralelo com o galvanômetro. Ou seja, deveríamos remover R1 para que, quando a chave fosse colocada na primeira posição (10 mA), a corrente total fluísse através do galvanômetro. Já para as demais escalas, os resistores teriam de ter os seguintes valores: R2 = 0,11 Ω (escala de 100 mA); R3 = 0,02 Ω (escala de 500 mA); e R4 = 0,01 Ω (escala de 1 A).

Como você pode reparar, o valor dos resistores de *shunt* são extremamente baixos. Isso é normal, pois idealmente um amperímetro tem que ter uma resistência interna a menor possível (idealmente zero ohm) para que ele não interfira no circuito. Voltaremos a este assunto em instantes.

Para que o amperímetro seja o mais confiável possível, esses resistores precisam ter valores praticamente idênticos aos valores calculados, isto é, precisam apresentar baixa tolerância. A tolerância dos resistores usados e a própria tolerância do galvanômetro darão a precisão (margem de erro) do amperímetro.

Usando um Amperímetro

Um instrumento de medida ideal não pode interferir no circuito que está sendo medido. Ou seja, a instalação de um amperímetro em um circuito não pode fazer com que as correntes e tensões do circuito sejam alteradas. Do contrário, a medida será baseada em um circuito que foi modificado pela inserção do instrumento de medida, e nós não queremos que isso aconteça.

Dessa forma, um amperímetro ideal tem resistência interna igual a zero, de forma que ele não influencie no funcionamento do circuito onde ele for inserido.

Um amperímetro deve ser instalado *em série* ao componente ou circuito que você deseja saber a corrente. Na Figura 18.3 mostramos a instalação de um amperímetro para medir a corrente total de um circuito e, na Figura 18.4, como o amperímetro deve ser instalado para descobrirmos a corrente que passa por R1.

No aparelho em si, deve ser feito o ajuste de escala (corrente de fundo de escala) para que consiga ser feita uma leitura clara do valor que está sendo indicado pelo galvanômetro.

No caso de aparelhos digitais, onde o galvanômetro é substituído por um mostrador de cristal líquido, a instalação é feita da mesma forma. Nesses aparelhos é também necessário escolher a corrente máxima (corrente de fundo de escala), muito embora amperímetros digitais mais recentes possam automaticamente configurar a escala, baseado na corrente sendo lida.

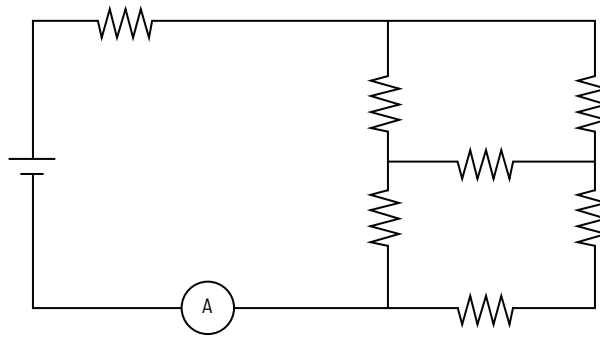


Figura 18.3: Instalação de um amperímetro para medir a corrente total do circuito.

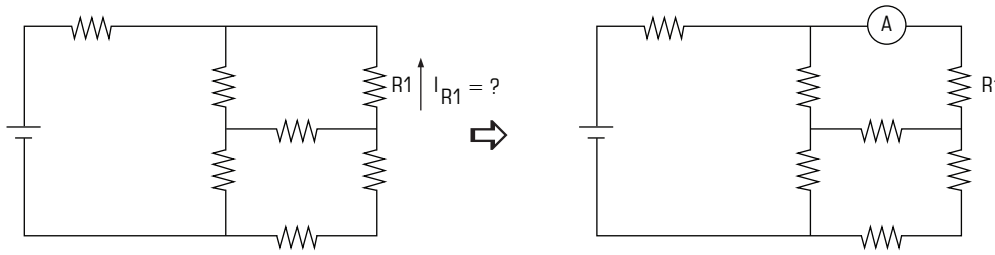


Figura 18.4: Instalação de um amperímetro para medir a corrente que passa por R1.

Amperímetros Indutivos

Vimos que, para instalar um amperímetro, é necessário "abrir" o circuito de forma a colocá-lo em série. Embora isso seja relativamente fácil de fazer em circuitos pequenos e em protótipos, há casos em que o circuito não tem como ser aberto para a instalação de um amperímetro. O exemplo mais claro é o de circuitos de corrente alternada. Por exemplo, para medir a corrente total sendo consumida em uma residência, a eletricidade toda da casa teria de ser cortada no quadro de luz para a instalação do amperímetro, e depois reinstalada.

Para evitar que se tenha de abrir o circuito, existem amperímetros indutivos. No Capítulo 10 explicamos que um fio conduzindo corrente elétrica produz um campo eletromagnético ao seu redor. Quanto maior for essa corrente, mais forte será esse campo eletromagnético. Também vimos que,

se esse campo for variável, ele gera uma corrente elétrica em um fio colocado dentro desse campo.

Assim, os amperímetros indutivos possuem uma bobina que é colocada ao redor do fio no qual queremos medir a corrente elétrica que está passando nele. O campo eletromagnético gerado pelo fio induzirá uma corrente na bobina do amperímetro, fazendo com que o galvanômetro que está ligado a essa bobina se mova.

Bobinas só induzem corrente em outro fio colocado ao seu lado quando operando em corrente alternada, pois corrente só é induzida quando há variação no campo eletromagnético. Com isso, os amperímetros indutivos mais comuns só funcionam para medir corrente alternada. Existem amperímetros indutivos mais sofisticados capazes de medir corrente contínua, usando uma técnica chamada Efeito Hall.

Amperímetros indutivos digitais funcionam com o mesmo princípio, porém o galvanômetro é substituído por um mostrador de cristal líquido.

Os amperímetros indutivos são também chamados de amperímetros "de alicate", por causa de seu formato: em amperímetros indutivos comerciais a parte onde a bobina (sensor) está localizada é aberta pressionando-se um botão, e visualmente este mecanismo lembra um alicate. Como explicado, a instalação deste tipo de amperímetro não necessita da abertura do circuito a ser medido: basta abrir o "alicate" do amperímetro, colocá-lo ao redor do fio onde queremos medir a corrente que está sendo consumida, fechar o "alicate" e efetuar a medida.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a principal característica de amperímetro ideal? Porquê?
2. Como um amperímetro deve ser ligado a um circuito?
3. Construa um amperímetro capaz de medir correntes de até 100 mA usando um galvanômetro com resistência interna de 200 Ω e corrente de fundo de escala de 100 μA.

Capítulo 19
Voltímetro

Introdução

Voltímetro é o nome dado ao instrumento de medida de tensão elétrica. Em muitos casos você precisará medir a tensão que está sendo aplicada em um determinado ponto de um circuito e, para isso, precisará usar um voltímetro. Neste capítulo mostraremos como um voltímetro é construído e como usar uma ferramenta deste tipo.

Como Construir um Voltímetro

Vimos que o galvanômetro é um instrumento que mede a corrente elétrica que passa por ele e possui dois valores declarados: sua corrente máxima (corrente de fundo de escala) e sua resistência interna.

Tendo esses dois valores, podemos facilmente descobrir qual é a tensão máxima que pode ser aplicada nos terminais de um galvanômetro para que o seu ponteiro chegue ao final de sua escala, transformando-o, assim, em um instrumento de medida de tensão elétrica, chamado voltímetro.

Supondo um galvanômetro com resistência interna de 1 Ω e corrente de fundo de escala de 10 mA, calculamos facilmente pela equação 4.3 que é necessário 0,01 V aplicado sobre ele para que o seu ponteiro atinja o fundo de escala.

Obviamente esse valor de tensão é muito baixo. Para construirmos um voltímetro, precisamos instalar um resistor em série para converter a escala do galvanômetro, de maneira similar ao que fizemos quando construímos um amperímetro. A diferença agora é que precisamos criar um

divisor de tensão e, com isso, o resistor precisará ser instalada em série com o galvanômetro, e não mais em paralelo. Ver Figura 19.1

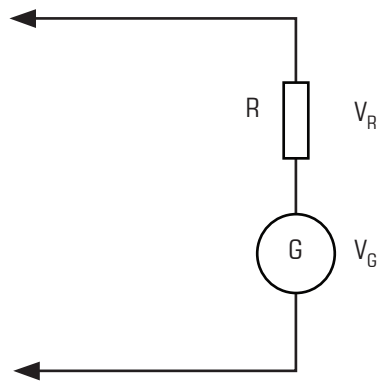


Figura 19.1: Construindo um voltímetro.

Para calcular o valor do resistor que deverá ser colocado em série com o galvanômetro, basta aplicar a fórmula do divisor de tensão:

$$V_R = \frac{R \cdot V}{R + R_G} \tag{19.1}$$

Logo:

$$V_G = \frac{R_G \cdot V}{R + R_G} \tag{19.2}$$

Para o nosso caso, o valor do resistor será dado por:

$$R = \left(\frac{V \cdot R_G}{V_G} \right) - R_G \tag{19.3}$$

Assim, se quisermos que, quando seja aplicado 10 V sobre o voltímetro o ponteiro de um galvanômetro com resistência interna de 1 Ω e corrente de fundo de escala de 10 mA atinja o máximo de sua escala, a resistência colocada em série deverá ser de 1 kΩ. Nesse nosso exemplo, se a escala do galvanômetro fosse de 1 a 10, caso o ponteiro parasse em "2" ao medirmos uma tensão, ele estaria indicando uma tensão de 2 V. Simples assim. Ou seja, nossos cálculos fazem com que a escala do galvanômetro, que originalmente mede corrente, passe a medir tensão.

Podemos converter a escala do galvanômetro para um valor de fundo de escala ainda maior – 100 V, por exemplo. Nesse caso, o valor do resistor em série será de 10 kΩ.

O problema de usarmos escalas grandes é que valores pequenos de tensão serão lidos com dificuldade. Por exemplo, se criarmos um voltímetro de 100 V, cada ponto da escala do galvanômetro valerá 10 V, no caso clássico de uma escala de 1 a 10. Para ler 1 V, o ponteiro do galvanômetro quase não se moveria, tornando a leitura do valor exato de tensão uma tarefa impossível.

Para resolver isso, os voltímetros comerciais trabalham com várias escalas, da mesma forma que os amperímetros. A chave que seleciona a tensão de fundo de escala na verdade troca o valor do resistor que está sendo colocado em série com o galvanômetro, como mostra a Figura 19.2.

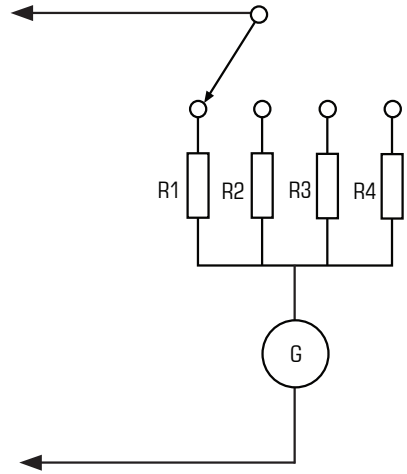


Figura 19.2: Seleção de escala de um voltímetro.

O valor dos resistores deve ser calculado da mesma maneira, isto é, dependendo do valor da tensão de fundo de escala desejada.

Voltímetro CA

O voltímetro que mostramos anteriormente não pode ser usado diretamente para medir tensões alternadas. Isso ocorre porque o voltímetro de tensão contínua mede a *tensão média*. Em uma tensão alternada simétrica, como a da rede elétrica, a tensão média é zero volt. Assim, o voltímetro marcará zero sempre.

Para corrigir isso, isto é, para transformar um voltímetro CC em um voltímetro CA, temos de instalar dois componentes em série: um diodo e um capacitor, como na Figura 19.3.

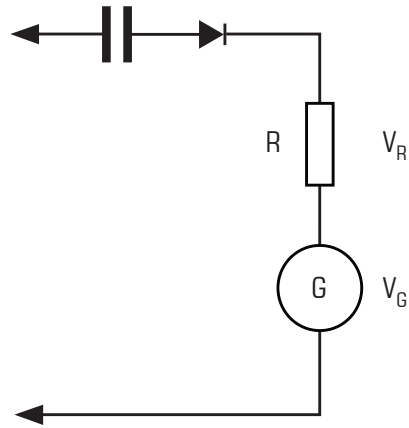


Figura 19.3: Voltímetro CA.

O diodo fará com que a tensão alternada seja *retificada*, isto é, somente o semiciclo positivo da tensão passa. Em outras palavras, a parte positiva da tensão alternada passará para o galvanômetro, e a parte negativa será bloqueada. Com isso, a tensão média não será mais igual a zero volt. Estudaremos o funcionamento dos diodos no Capítulo 27, por isso não se preocupe muito com o funcionamento desse componente por enquanto.

Já o capacitor é para assegurar que somente passará para o voltímetro tensão alternada (o capacitor é um componente que bloqueia a tensão contínua, deixando passar somente tensão alternada). Assim, se o voltímetro CA for usado para ler uma tensão alternada que esteja flutuando sobre um nível CC (ou seja, existe um "offset"), esse nível CC será bloqueado. Por exemplo, em uma tensão alternada variando sobre um nível de 3 V, o capacitor bloqueará esses 3 V, fazendo com que a tensão alternada passe a variar sobre um nível de zero volt – em outras palavras, ajustando o offset para zero. Este capacitor é também conhecido como capacitor de desacoplamento. Este capacitor é também conhecido como *capacitor de desacoplamento.*

Após a instalação de um diodo e de um capacitor compatíveis com a tensão a ser medida, o voltímetro poderá ser usado para medir tensões alternadas.

Normalmente em voltímetros comerciais ou há uma escala separada para a medição de tensões contínuas e alternadas ou então há uma chave chamada "CC/CA". Essa chave justamente acrescenta ou remove do circuito o capacitor e o diodo.

Note que voltímetros CA são feitos para medir somente tensões alternadas no padrão da rede elétrica domiciliar, isto é, formas de onda senoidais com frequência de 50 ou 60 Hz. Você não conseguirá medir corretamente valores de formas de onda de outros tipos (quadradas ou triangulares, por exemplo) nem com frequências diferentes de 50 ou 60 Hz. Para medir valores de tensão de outros tipos de forma de onda ou mesmo de tensões alternadas senoidais de frequências mais altas, é necessário o uso de outro instrumento de medida, como um osciloscópio, um multímetro digital com função "True RMS" ou mesmo um frequencímetro.

Usando um Voltímetro

Como explicado no capítulo passado, a instalação de um instrumento de medida não pode alterar o funcionamento do circuito no qual ele está sendo instalado, do contrário teremos uma leitura de um valor errado.

A resistência interna do voltímetro teria de ser a mais alta possível, e um voltímetro ideal tem resistência interna infinita. Caso o voltímetro tenha uma resistência interna baixa, muita corrente será desviada para o voltímetro, fazendo com que o funcionamento do circuito seja alterado, fazendo com que o voltímetro não leia a verdadeira tensão que está sendo aplicada sobre o componente.

O voltímetro deve ser instalado em *paralelo* ao componente cuja tensão queremos medir. Na Figura 19.4 mostramos a instalação de um voltímetro para medir a tensão sobre R1.

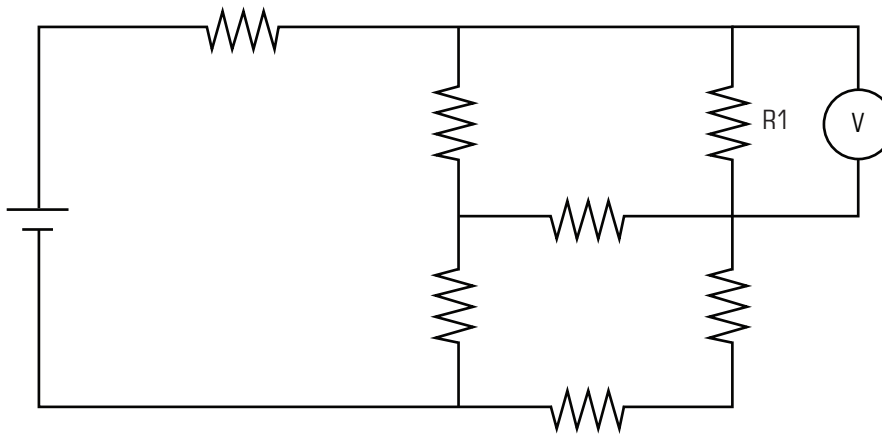


Figura 19.4: Instalação de um voltímetro.

Além de ter de instalar o voltímetro em paralelo com a tensão que você deseja medir, você deverá selecionar a melhor escala (tensão de fundo de escala) para poder ler corretamente o valor da tensão que está sendo medida. Em aparelhos comerciais normalmente há escalas separadas para tensão contínua e tensão alternada, e você deverá escolher de acordo.

No caso de aparelhos digitais, onde o galvanômetro é substituído por um mostrador de cristal líquido, a instalação é feita da mesma forma. Nesses aparelhos é também necessário escolher a tensão máxima, muito embora voltímetros digitais mais recentes possam automaticamente configurar a escala, baseado na tensão sendo lida.

Sensibilidade

Vimos que o ideal é o voltímetro ter uma resistência interna muito alta (idealmente infinita), de modo que o instrumento não consuma corrente do circuito que está sendo medido e, com isso, não apresente um resultado falso nem tampouco interfira no funcionamento do circuito.

A resistência interna de voltímetros analógicos (instrumentos usando galvanômetros) varia de acordo com a escala selecionada do instrumento (já que em cada escala adicionamos um resistor de valor diferente em série com o galvanômetro), ao contrário dos voltímetros digitais, que possuem uma resistência interna fixa, de normalmente 10 MΩ. Essa resistência interna de voltímetros analógicos é também chamada *sensibilidade* e é medida em uma unidade chamada Ohm por Volt (Ω/V).

Supondo um voltímetro com uma sensibilidade de 50 kΩ/V, sua resistência interna quando ele estiver posicionado na escala de 12 V será de 600 kΩ. Esse mesmo voltímetro terá uma resistência interna de 6 MΩ quando posicionado em sua escala de 120 V, e 15 MΩ quando posicionado em sua escala de 300 V.

A sensibilidade de um voltímetro é facilmente calculada através da fórmula abaixo.

$$\text{Sensibilidade} = \frac{1}{\text{corrente de fundo de escala do galvanômetro}} \qquad (19.4)$$

Assim, um voltímetro usando um galvanômetro de 1 mA de corrente de fundo de escala tem uma sensibilidade de 1 kΩ/V.

Os voltímetros analógicos normalmente possuem sua sensibilidade estampada em um canto de sua escala. Assim podemos facilmente descobrir a corrente de fundo de escala de seu gal-

vanômetro (basta dividir 1 pela sensibilidade; em calculadoras científicas você pode fazer isso entrando o valor da sensibilidade e pressionando o botão x^{-1}).

Note que essa maneira de calcular a sensibilidade de um voltímetro só é válida para a escala de tensão contínua. Na escala de tensão alternada há um circuito retificador na entrada (um capacitor e um diodo, como vimos) que altera a impedância interna do circuito, fazendo com que o cálculo da resistência interna não seja tão simples. Na realidade, a sensibilidade para a escala de tensão alternada é mais baixa do que para a escala de tensão contínua. Como dissemos, em instrumentos comerciais analógicos esses valores vêm estampados em um canto da escala do instrumento.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a principal característica de voltímetro ideal? Por quê?
2. Como um voltímetro deve ser ligado a um circuito?
3. Construa um voltímetro capaz de medir tensões de até 30 V usando um galvanômetro com resistência interna de 500 Ω e corrente de fundo de escala de 1 mA.
4. Qual é a sensibilidade do voltímetro construído na pergunta 3?

Capítulo 20
Ohmímetro

Introdução

Como você pode supor, ohmímetro é o nome dado ao instrumento capaz de medir uma resistência elétrica desconhecida. No Capítulo 17 havíamos visto um instrumento rudimentar com essa finalidade: a Ponte de Wheatstone. A grande desvantagem da Ponte de Wheatstone é que precisamos ter uma caixa contendo várias resistências (chamada década) para descobrirmos o valor da resistência desconhecida. Com um ohmímetro nós podemos ler diretamente o valor da resistência através de um ponteiro ou mostrador.

Como Construir um Ohmímetro

Da mesma forma que transformamos um galvanômetro em um medidor de tensão, podemos facilmente transformá-lo em um medidor de resistências – afinal a relação entre corrente, tensão e resistência é dada pela Lei de Ohm.

Só há um problema: se você ligar um galvanômetro a uma resistência diretamente, seja qual for o seu valor, quanto marcará o ponteiro do galvanômetro? Zero, já que não haverá circulação de corrente elétrica no circuito, uma vez que não existirá uma fonte de alimentação. E, como você já sabe, o galvanômetro marca na realidade corrente – nós é que fazemos uma transformação em sua escala para que ele passe a marcar qualquer outra unidade.

Com isso, ao contrário do amperímetro e do voltímetro, o ohmímetro necessita de uma fonte de alimentação – ou seja, esse instrumento obrigatoriamente será alimentado por pilhas. Na Figura 20.1 vemos como funciona um ohmímetro.

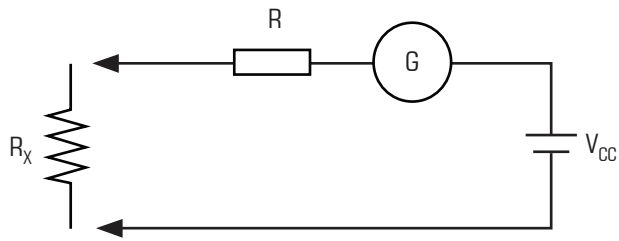


Figura 20.1: Construindo um ohmímetro.

A primeira coisa que você precisa entender em um ohmímetro é que a sua escala é invertida, isto é, a escala de leitura do galvanômetro cresce da direita para a esquerda e não da esquerda para a direita como é o usual. Isso ocorre porque, quanto menor o valor da resistência a ser medida (R_X), maior será a corrente do circuito, ao passo que, quanto maior o valor da resistência a ser medida, menor será a corrente do circuito. Basta observarmos a Lei de Ohm para vermos que a corrente é inversamente proporcional à resistência, isto é, quanto maior a resistência, menor a corrente elétrica, enquanto que, quanto menor a resistência, maior a corrente elétrica. Ver equação 4.2

Para entender melhor essa ideia, observe que, quando as ponteiras do instrumento não estão conectadas a um componente, o circuito estará aberto e, portanto, medindo uma resistência "infinita". Como o circuito estará aberto, o ponteiro do galvanômetro estará parado em sua posição de descanso – que por acaso é a posição "zero" em uma escala normal. Em ohmímetros comerciais, a posição de descanso do ponteiro é marcada com o símbolo ∞, infinito.

Já quando as ponteiras de um ohmímetro estão ligadas uma na outra, isso indica uma resistência igual a zero, fazendo com que circule o máximo de corrente no circuito, fazendo com que o ponteiro do galvanômetro atinja o seu fundo de escala. Essa posição é marcada como "zero", pois é a posição que indica que a resistência que está sendo medida vale zero ohm.

Para projetarmos um ohmímetro, temos um problema: como fazer para desenhar a nossa escala no galvanômetro? Se a posição de descanso vale infinito e a posição onde a corrente é máxima vale zero, em princípio não há como desenharmos uma escala para o nosso aparelho de medida.

Isso é facilmente resolvido arbitrando um valor para representar o meio de escala, isto é, o valor da resistência a ser lida (R_X na Figura 20.1) que fará com que o ponteiro do galvanômetro fique centralizado. Para que o ponteiro do galvanômetro fique no meio de escala é necessário que por ele esteja passando uma corrente de exatamente metade de sua corrente máxima (corrente de fundo de escala). Com essas informações torna-se possível construir um ohmímetro.

Pela equação 4.4 podemos facilmente calcular o valor da resistência R que deverá ser colocada em série com o galvanômetro. Como R = V / I e nesse caso a resistência total do circuito será a soma da resistência que está sendo lida (R_X), o resistor em série com o galvanômetro (R) e a resistência interna do galvanômetro (R_G), podemos deduzir facilmente a fórmula:

$$R = \left(\frac{V}{I}\right) - R_X - R_G \qquad (20.1)$$

Onde I é a metade do valor da corrente de fundo de escala do galvanômetro, ou seja, $I = I_G / 2$.

Normalmente o valor arbitrado para a resistência de centro de escala é de 100 Ω. Assim, supondo um galvanômetro com 10 mA de corrente de fundo de escala e resistência interna de 1 Ω, e supondo uma fonte de alimentação de 3 V (duas pilhas pequenas em série, por exemplo), facilmente calculamos que o resistor que deverá ser instalado em série com o galvanômetro deverá ser de 499 Ω.

Temos, porém, um grande problema com a escala do ohmímetro. Apesar de indicar qualquer resistência entre zero e infinito, ela não é dividida linearmente. Para você entender isso melhor, observe a Figura 20.2. Neste instrumento em particular, temos o valor de 90 Ω como centro de escala. Isso significa que, na leitura de uma resistência de 1 kΩ, o ponteiro ficará muito próximo do final da escala. Não conseguiríamos saber o valor, com precisão, de uma resistência desconhecida que está sendo medida e que possuísse um valor entre 500 Ω e 1 kΩ, por exemplo. Ler uma resistência com valor acima de 1 kΩ com precisão é praticamente impossível, neste caso. Na leitura de valores acima de 5 kΩ, o ponteiro praticamente não se moverá.

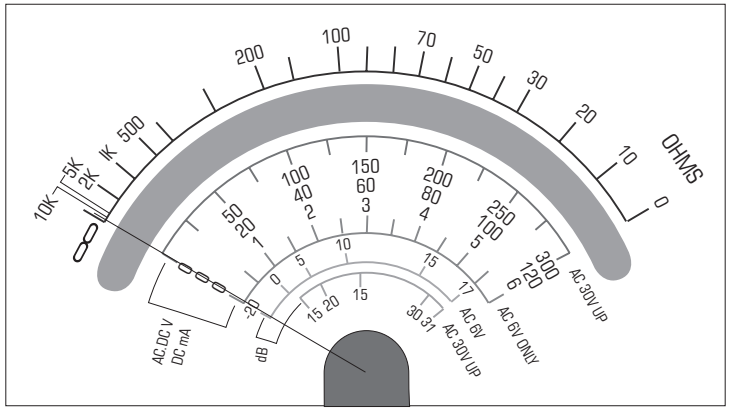


Figura 20.2: Escala de um ohmímetro típico.

Por esse motivo, os ohmímetros comerciais trabalham com várias escalas e uma chave seletora de escala – similarmente ao que ocorre com os voltímetros e com os amperímetros. Essa chave seletora simplesmente troca o valor do resistor que é colocado em série com o galvanômetro, fazendo com que o valor de referência usado no meio da escala seja outro.

Além disso, nos ohmímetros comerciais há um pequeno potenciômetro (que é um resistor variável) de ajuste de zero, também colocado em série com o galvanômetro. Esse ajuste de zero é necessário porque, como sabemos, uma pilha vai ficando "fraca" à medida que vai sendo consumida. Isso significa que a nossa fonte de alimentação de 3 V pode não mais ter exatamente 3 V instantes depois, comprometendo a correta leitura que é feita pelo circuito. O ajuste de zero serve, portanto, para equilibrar o circuito com o valor correto da fonte de alimentação no momento exato da leitura que será feita.

Normalmente as escalas existentes são x1Ω, x100Ω, x1kΩ e x10kΩ. Esses valores indicam por quanto você deverá multiplicar o valor sendo lido na escala. Por exemplo, alterar-se a chave para a posição x100Ω fará com que a leitura da escala do ohmímetro seja feita multiplicando-se por 100 o valor estampado. Com isso, o valor estampado como "100" na escala deverá ser lido como sendo 10 kΩ (100 · 100 Ω) quando o aparelho estiver com sua chave seletora posicionada em x100Ω.

Continuando o exemplo do ohmímetro que estávamos construindo, devemos calcular o valor do resistor R quando o ohmímetro está na escala x100. Para isso, devemos supor R_X como sendo 10 kΩ. Assim, o valor do resistor que deverá ser colocado em série será de - 9401 Ω. Opa! Há alguma coisa errada. A nossa conta retornou um valor negativo de resistência, o que não é possível de ser executado na prática. Quando isso ocorre no cálculo, significa que devemos usar outro galvanômetro, com uma corrente de fundo de escala menor, ou que devemos usar uma fonte de alimentação com um valor maior.

O fato é que em nosso exemplo estávamos usando um galvanômetro com uma corrente de fundo de escala muito alta, de 10 mA. Ohmímetros comerciais (normalmente agregados com um voltímetro e um amperímetro em um único instrumento chamado multímetro, como veremos no próximo capítulo) normalmente usam galvanômetros com baixíssimas correntes de fundo de escala, na ordem de microampères. Para um exemplo real, vamos considerar um galvanômetro com corrente de fundo de escala de 7,5 μA e resistência interna de 1 Ω. Vamos também utilizar uma fonte de 3 V (duas pilhas pequenas de 1,5 V ligadas em série).

Fazendo as contas, você encontrará os seguintes valores de resistores, para as seguintes escalas: x1Ω = 799.899 Ω; x100Ω = 789.999 Ω; x1kΩ = 699.999 Ω. Já para a escala de 10 kΩ, o problema: o resultado dá negativo. Por esse motivo, para essa escala é necessário usar uma fonte de alimentação de outro valor. Normalmente em ohmímetros analógicos comerciais é usada uma bateria de 22,5 V para alimentar a escala x10kΩ (o valor da resistência nesse caso será de 4.999.999 Ω). Na Figura 20.3 mostramos o diagrama simplificado desse ohmímetro que calculamos.

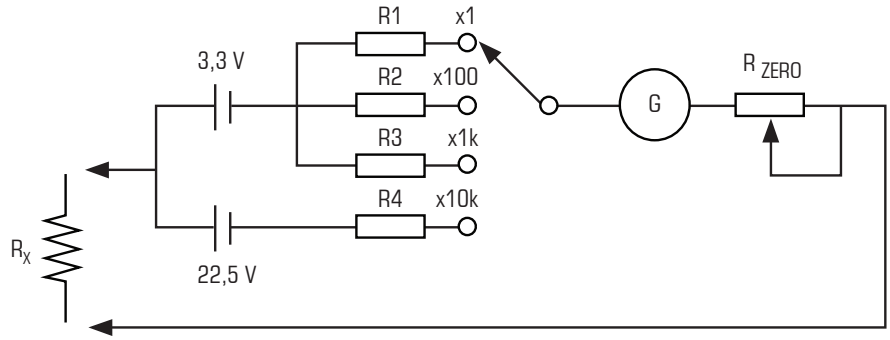


Figura 20.3: Seleção de escala de um ohmímetro.

Se você reparar atentamente, agora temos um potenciômetro para o ajuste de zero ohm (R_{ZERO}), como explicamos anteriormente. Assim, as resistências que calculamos não são R1 a R4, mas sim R1 a R4 mais R_{ZERO}. O valor do potenciômetro é arbitrado e o valor de R1, R2, R3 e R4 é o valor do resistor calculado menos o valor do potenciômetro.

O valor do potenciômetro definirá o ponto em que será necessário trocar as pilhas do aparelho, isto é, o ponto em que mesmo ajustando o potenciômetro não é possível fazer com que o ponteiro do galvanômetro marque zero quando as duas ponteiras de prova do ohmímetro são encostadas uma na outra.

Assim, o valor do potenciômetro deverá ser calculado baseado no valor mínimo que as pilhas do aparelho atingirão para que ele continue funcionando. Um potenciômetro é um resistor variável, ou seja, sua resistência varia de zero ohm até o seu valor estampado e essa variação é controlada através de um botão. Se usarmos um potenciômetro de 470 kΩ, isso significa que a sua resistência variará de zero a 470 kΩ, dependendo da posição do botão.

Se usarmos um potenciômetro desse valor, os valores dos resistores terão de ser: R1 = 329.899 Ω; R2 = 319.999 Ω; R3 = 229.999 Ω; R4 = 4.529.999 Ω. Esses valores são os da resistência calculada menos 470 kΩ, que é o valor do potenciômetro ligado em série.

A partir de qual tensão que a pilha atingir será necessário trocá-las, ou seja, você não conseguirá mais fazer o ajuste de zero ohm? Essa tensão é facilmente calculada pela fórmula $V = I \cdot (R + R_X + R_G)$, onde I é a metade da corrente de fundo de escala do galvanômetro, R_X é a resistência de meio de escala e R é o valor de R1, R2, R3 ou R4, dependendo da escala. Neste nosso exemplo temos que nas escalas que usam uma fonte de alimentação de 3 V (escalas x1Ω, x100Ω e x1kΩ) essa tensão é de 1,2375 V, enquanto que na escala que usa a bateria de 22,5 V (escala x10kΩ) essa tensão é de 20,7375 V.

Obviamente esse só foi um exemplo para você entender como esse cálculo é feito. Na prática é bem provável que usássemos um potenciômetro de valor mais elevado para que pudéssemos ter uma condição de "pilha gasta" com uma tensão menor, especialmente no caso da escala x10 kΩ, onde o valor encontrado foi muito próximo ao valor nominal da bateria.

Usando um Ohmímetro

A primeira coisa que você precisa fazer, caso esteja usando um ohmímetro analógico, é fazer o ajuste de zero. Para isso, encoste as duas pontas de prova e ajuste o potenciômetro do aparelho até que o ponteiro marque zero.

Para usar um ohmímetro, o componente cuja resistência você deseja medir deverá estar *desconectado do seu circuito de origem*. Isso ocorre por alguns motivos. Primeiro, porque poderá haver outros componentes ou outros circuitos ligados em paralelo ao componente sendo medido, fazendo com que o instrumento meça não o valor da resistência do componente, mas a resistência total de todos os componentes e circuitos conectados ao ohmímetro.

Vemos este problema na Figura 20.4, onde queremos saber o valor de R4. Se ligarmos o ohmímetro como indicado, o valor lido *não será o valor da resistência de R4*, mas sim o valor total da resistência do circuito visto do ponto onde as pontas de prova do ohmímetro foram inseridas. Neste exemplo, o valor lido pelo ohmímetro será [(R1 // R2) + R3] // R4, se a fonte de alimentação estiver desligada e não tiver sido removida do circuito (fontes de alimentação possuem resistências internas extremamente baixas; podemos considerar a resistência interna de uma fonte como sendo zero ohm). Se a fonte de alimentação for removida do circuito (por exemplo, pilhas que foram removidas de seu suporte), então o ohmímetro marcará a resistência de (R2+R3) // R_4.

Se a fonte estiver ligada, não temos como determinar facilmente o valor que será lido pelo ohmímetro, como explicaremos mais adiante.

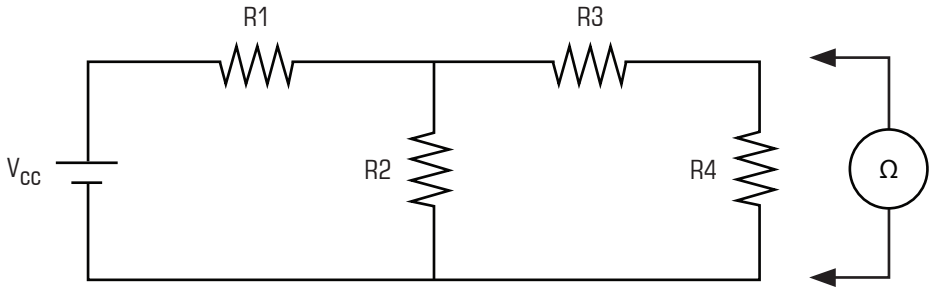


Figura 20.4: Maneira incorreta de se usar o ohmímetro (ver texto).

O segundo problema é o fato de que no circuito existem outras fontes de tensão. Como o ohmímetro mede resistência aplicando uma tensão em suas pontas de prova, tensões vindas de um circuito externo irão obrigatoriamente alterar o valor indicado pelo ohmímetro, fazendo com que o ohmímetro mostre um valor que não corresponde à resistência que está sendo lida.

Como dissemos, para medir a resistência de um componente é necessário desconectá-lo totalmente do circuito. No dia a dia do técnico, muitas vezes a medição de uma resistência é feita simplesmente desconectando-se um dos terminais do componente, no caso de componentes de dois terminais, como resistores e diodos. Mostramos esse procedimento na Figura 20.5, que pode ser feito sem medo, já que o componente estará desconectado do circuito (ele representará um circuito aberto para o circuito e, portanto, nenhuma tensão ou corrente será encontrada sobre ele, não interferindo, portanto, na leitura de sua resistência através de um ohmímetro). No caso de você querer ler a resistência de componentes com mais de dois terminais, como transistores, você deverá obrigatoriamente remover o componente do circuito, ou então "levantar" (remover do circuito) todos os terminais menos um.

Em todos os casos, você deverá desligar o circuito a ser medido, para evitar problemas. Por exemplo, se você remover um transistor de uma televisão com ela ligada, além de possivelmente tomar um baita choque, poderá ainda queimar outros componentes.

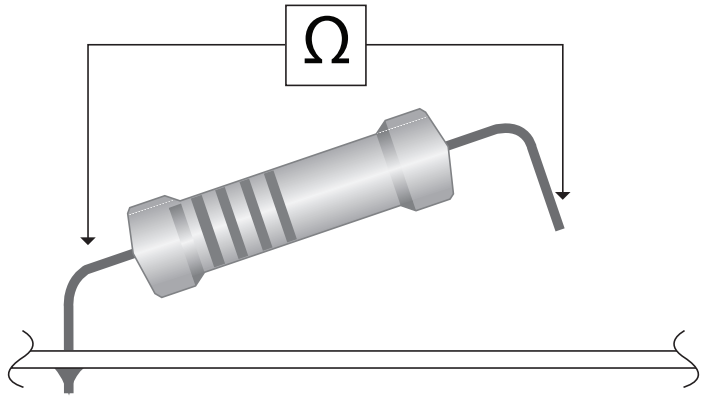


Figura 20.5: Lendo a resistência de um resistor em um circuito.

Após remover o componente a ser medido do circuito e encostar as pontas de prova nos terminais do componente, você deverá selecionar a melhor escala para poder ler corretamente o valor da resistência que está sendo medida.

No caso de aparelhos digitais, onde o galvanômetro é substituído por um mostrador de cristal líquido, a instalação é feita da mesma forma. Nesses aparelhos é também necessário escolher a escala a ser usada, muito embora ohmímetros digitais mais recentes possam automaticamente configurar a escala, baseado na resistência sendo lida.

Na Parte 5 do livro explicaremos como o ohmímetro pode ser usado para verificar se componentes eletrônicos estão bons ou ruins (queimados).

◆◆◆

Exercícios

1. Como um ohmímetro deve ser instalado para ler o valor de uma resistência desconhecida?
2. Por que ohmímetros analógicos possuem um ajuste de zero?
3. Construa um ohmímetro com valor de 1 kΩ no centro da escala, usando uma bateria de 9 V e um galvanômetro com resistência interna de 500 Ω e corrente de fundo de escala de 200 μA.

Capítulo 21
Multímetro

Introdução

Multímetro ou multiteste é o nome de um instrumento de medida múltiplo, capaz de medir, pelo menos, corrente, tensão e resistência. Como o "coração" desses instrumentos de medida é o mesmo – o galvanômetro – é fácil criar um instrumento que possa medir todas essas unidades simplesmente trocando-se a posição de uma chave seletora.

Na realidade é muito difícil você encontrar no mercado um amperímetro, um voltímetro ou um ohmímetro avulsos. Normalmente eles estão integrados em um multímetro. A peça mais cara de todos esses instrumentos de medida é o galvanômetro, por ser um instrumento de precisão. Quanto mais preciso e sensível, mais caro é um galvanômetro. Assim, a vantagem de um multímetro é usar apenas um único galvanômetro para todos os instrumentos de medida. Se você pode ter um instrumento mais barato que pode medir tudo, para que ter três instrumentos separados?

Se você realmente quer trabalhar com eletrônica ou levar seu hobby a sério, obrigatoriamente terá de fazer um investimento comprando um multímetro.

Os multímetros podem ser analógicos (quando utilizam um galvanômetro como instrumento de leitura) ou digitais (quando utilizam um mostrador de cristal líquido para a leitura do valor medido pelo instrumento). Nas Figuras 21.1 e 21.2 mostramos um multímetro analógico e um multímetro digital.

Independentemente se o multímetro é analógico ou digital, a maneira como ele é usado é praticamente a mesma. A maioria dos multímetros possui pelo menos as seguintes escalas:

- Resistência
- Tensão Contínua
- Tensão Alternada
- Corrente Contínua

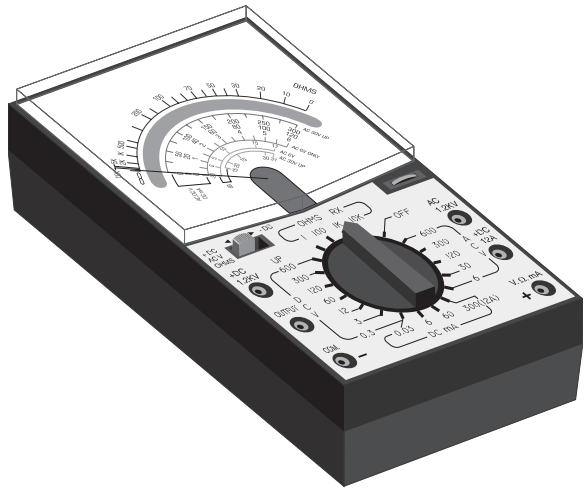


Figura 21.1: Multímetro analógico.

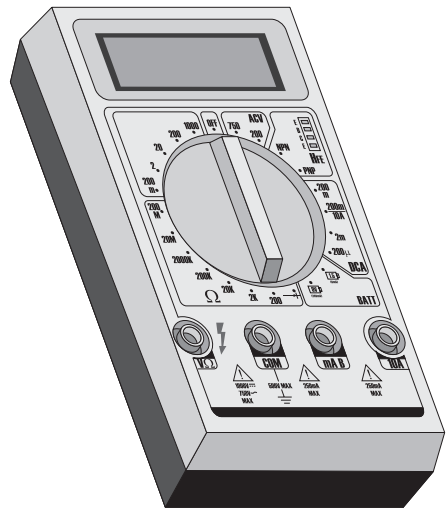


Figura 21.2: Multímetro digital.

Multímetros capazes de medir corrente alternada não são muito comuns e são normalmente destinados a profissionais que operam com a área de eletricidade e não com a área de eletrônica, visto que na área de eletrônica as medidas de corrente alternada não são comuns.

É importante ressaltarmos que a escala de tensão alternada dos multímetros mede somente tensões com padrão da rede elétrica, isto é, do tipo senoidal e com frequências de 50 ou 60 Hz. Se você tentar medir uma forma de onda triangular, quadrada ou senoidal de frequências diferentes de 50 ou 60 Hz com um multímetro, ele apresentará um falso resultado. Multímetros digitais mais incrementados possuem uma função chamada "True RMS" que torna o multímetro capaz de medir tensões de outras formas de onda diferentes da senoidal e tensões senoidais com frequências acima de 60 Hz.

Multímetros Analógicos vs. Digitais

Além da óbvia diferença entre o uso de um galvanômetro em multímetros analógicos e um mostrador de cristal líquido em multímetros digitais, há algumas diferenças importantes entre esses dois tipos de aparelho.

Multímetros analógicos possuem um ajuste de zero para as escalas de resistência, ajuste este não necessário em multímetros digitais. Além disso, a escala de resistência em multímetros analógicos é invertida, crescendo da direita para a esquerda e não da esquerda para a direita.

Multímetros analógicos possuem ainda uma chave +/- para que você possa inverter a polaridade das pontas de prova sem a necessidade de removê-las do aparelho, pois, se as pontas de prova estiverem invertidas na hora de efetuarmos uma medida, o ponteiro tentará mover-se para um valor abaixo de zero, e você não conseguirá efetuar a medida. É verdade que você pode simplesmente inverter a posição das pontas de prova no circuito, mas esta chave pode vir a ser útil em algumas situações (por exemplo, se você já fixou as pontas de prova dentro do aparelho onde está efetuando as medidas). No caso de multímetros digitais, serão simplesmente apresentados os símbolos "+" ou "-" no mostrador, não havendo necessidade de se inverter as pontas de prova durante a leitura de um valor negativo.

Multímetros digitais normalmente possuem uma escala extra para o teste de diodos e transistores. Em multímetros analógicos é usada a escala de resistência para o teste desse tipo de componente. Em multímetros digitais essa escala em separado é necessária porque a tensão aplicada nas pontas de prova na escala de resistência são mais baixas do que 0,6 V, tensão mínima necessária para fazer qualquer semicondutor funcionar, como estudaremos no Capítulo 27. Assim, na escala de teste de diodo é aplicada uma tensão acima de 0,6 V nas pontas de prova, permitindo o teste de componentes semicondutores como diodos e transistores. Na Parte 5 do livro nós explicaremos em detalhes como usar o multímetro para testar componentes eletrônicos.

Você deve estar se perguntando por que os multímetros analógicos ainda existem, já que os multímetros digitais são muito mais práticos, pois apresentam uma leitura mais simples e precisa – fora o fato de na escala de resistência de multímetros analógicos haver a necessidade de se fazer o ajuste de zero, a leitura ser invertida em relação às escalas de corrente e tensão, e haver a necessidade de multiplicar o valor sendo lido pelo valor da escala.

O fato é que há ainda algumas aplicações em que multímetros analógicos ainda são melhores do que os digitais. A história é a seguinte: os multímetros digitais possuem uma resistência interna fixa de 10 MΩ na escala de tensão. Assim, independentemente da escala de tensão (20 V, 200 V, 1000 V etc.) em que o multímetro for posicionado, sua resistência interna será de 10 MΩ. Já em um multímetro analógico a sua resistência interna varia de acordo com a escala.

Supondo que você queira medir uma tensão de 400 V com um multímetro analógico que possua uma sensibilidade de 50 kΩ/V em sua escala de 1.000 V, ele terá uma resistência interna de 50 MΩ, cinco vezes maior do que a resistência interna de um multímetro digital na mesma escala (10 MΩ). Em aparelhos de televisão e monitores de vídeo baseados em tubo de raios catódicos, onde às vezes é necessário medir tensões dessa magnitude, o uso do multímetro digital não é aconselhado, já que consumirá uma corrente que alterará o funcionamento normal do circuito, dando um falso resultado ou mesmo impedindo o circuito de funcionar.

Os multímetros digitais mais incrementados poderão vir com mais instrumentos conjugados, como testadores de transistores, capacímetros, frequencímetros, termômetros (normalmente necessitando de uma ponta de prova especial contendo um sensor de temperatura), testador de continuidade (escala que emite um bipe quando as pontas de prova encostam uma na outra para verificar se há conexão entre dois pontos do circuito), escala TrueRMS (ver tópico anterior) e muito mais. Isso dependerá da marca e do modelo do seu multímetro e também do quanto você tiver disposto a pagar em um instrumento desse tipo.

Como Usar um Multímetro

O uso de um multímetro é muito simples. Não importa se ele é analógico ou digital, o processo é o mesmo.

Todo multímetro vem com duas pontas de prova, uma vermelha (positiva) e uma preta (negativa). A ponteira preta deve ser instalada no orifício rotulado “COM”, “GND” ou similar. Já a ponteira vermelha deve ser instalada no orifício correspondente à escala que você pretende usar.

Normalmente multímetros possuem dois ou três conectores para a ponteira vermelha. Um deles é sempre reservado para a medida de correntes contínuas de valor elevado, na ordem de ampères, normalmente rotulado “A” ou o limite máximo suportado pelo multímetro (“10 A”, por exemplo).

No caso de multímetros com três conectores para a ponteira vermelha, um dos conectores deve ser usado para a medida de resistência e tensão (rotulado "VΩ"), enquanto que o outro conector deve ser usado para a medida de correntes contínuas na ordem de miliampères (rotulado "mA"). Já no caso de multímetros com dois conectores para a ponteira vermelha, um único conector é usado para a medida de tensão, resistência e corrente (rotulado "V·Ω·mA").

Desta forma, instale a ponteira vermelha no orifício correspondente à grandeza que você pretende medir.

Feito isso, mova a chave seletora de escala do multímetro para a escala a ser usada. Você deve fazer isso antes de o multímetro ser inserido ao circuito a ser medido. Caso contrário você poderá queimar o aparelho (ou um pequeno fusível de proteção que ele possui internamente) caso o utilize na escala errada como, por exemplo, tentar medir corrente ou tensão e colocar o multímetro na escala de resistência, o que pode ocorrer por frações de segundo quando você gira a chave seletora de escala.

Se o seu multímetro tiver várias escalas para uma mesma grandeza (várias escalas diferentes de tensão, várias escalas diferentes de resistência etc.), o ideal é posicioná-lo na escala mais alta da grandeza a ser medida e, depois que o multímetro estiver inserido no circuito a ser medido, ir baixando a escala até você ter uma leitura agradável da grandeza. No caso de multímetros com seleção automática de escala, este passo não é necessário.

Vamos agora explicar em detalhes como usar o multímetro para medir continuidade, resistência, tensão e corrente. Alguns componentes eletrônicos podem ser testados usando um multímetro. Nos capítulos da Parte 5 do livro explicaremos como isso é feito.

Teste de Continuidade

Você pode usar um multímetro para testar se dois pontos de um circuito possuem conexão. Este teste serve para você verificar se dois pontos que deveriam estar conectados estão realmente conectados, se dois pontos que não deveriam estar conectados estão conectados por engano, se fios estão partidos, ou até mesmo para descobrir onde determinados fios estão conectados no circuito.

Este teste deve ser feito com o multímetro na escala de resistência, preferencialmente na escala de resistência mais baixa do multímetro. É importante entender que se você colocar o multímetro em escalas de resistência alta, poderá medir a resistência da sua pele ao encostar seus dedos nas pontas de prova e, em testes de continuidade de fios, é muito comum usarmos os dedos para segurarmos o contato das pontas de prova com as extremidades do fio sendo testado.

Alguns multímetros digitais possuem uma escala específica para o teste de continuidade, que emite um bipe quando a resistência entre as pontas de prova é zero, ou seja, quando há continuidade. Se o seu multímetro tiver esta escala, use-a.

Você deverá desligar totalmente o circuito sendo testado, para evitar que tome choques, crie curtos-circuitos dentro do circuito e queime seu multímetro.

Para efetuar o teste de continuidade simplesmente encoste as pontas de prova nos locais onde você quer testar a continuidade (por exemplo, se você estiver testando a continuidade de um fio, encoste uma das pontas de prova em uma das extremidades do fio e, a outra, na extremidade oposta). Se houver continuidade o multímetro passará a marcar zero ohm ou emitirá um bipe, dependendo da escala em que ele estiver posicionado (resistência ou continuidade).

Obviamente você deverá encostar as pontas de prova em uma área metálica (isto é, que faça contato) do ponto a ser testado.

Em cabos que possuam mais de um fio, e caso eles sejam isolados individualmente, é importante você verificar se os fios do cabo não estão fazendo contato uns nos outros. Assim, além de testar a continuidade de cada fio, você deverá testar para ver se um fio não está fazendo contato em outro fio do mesmo cabo. Neste caso ao colocar as pontas de prova em fios diferentes o multímetro deverá estar indicando resistência infinita (isto é, em multímetros analógicos o ponteiro não deverá mexer e em multímetros digitais o mostrador deverá permanecer sem mostrar qualquer número) ou não deverá estar emitindo nenhum som.

Medida de Resistência

Se você estiver usando um multímetro analógico, precisará primeiro fazer o ajuste de zero. Para isso, encoste as duas ponteiras uma na outra e mova o potenciômetro de ajuste de zero até que você veja o ponteiro do multímetro perfeitamente posicionado sobre a posição “0 ohm”. Se movendo o potenciômetro totalmente para a esquerda e para a direita você não conseguir fazer o ajuste de zero, significa que você precisa trocar as pilhas do seu multímetro.

Para medir a resistência de um componente você deverá remover o componente do circuito (esta remoção deve ser feita com o circuito desligado, é claro). Caso você não faça isso o valor medido estará errado. No caso de componentes de dois terminais (por exemplo, resistores) você pode ganhar tempo dessoldando apenas um dos terminais do componente, como mostramos na Figura 21.3. Caso você opte por fazer isso, o circuito no qual o componente está conectado precisará estar desligado.

Como você começará a medida a partir da escala mais alta do seu instrumento, mova a chave seletora para a escala que lhe permitirá visualizar o valor da resistência com a maior precisão possível.

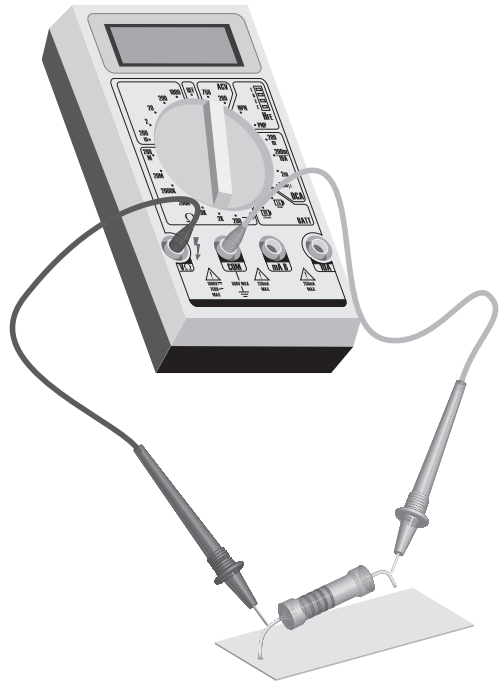


Figura 21.3: Medindo a resistência de um componente.

Medida de Tensão

Para medir a tensão entre dois pontos, basta instalar as ponteiras do multímetro nos dois pontos em que você quer medir a tensão (ver Figura 21.4) com o circuito *ligado*.

Como você estará medindo tensões em um circuito em funcionamento, tome cuidado para não encostar seus dedos em nenhum ponto do aparelho. Da mesma forma, você deverá ser extremamente cuidadoso para não fazer com que a ponta de prova crie uma ligação entre dois pontos que não deveriam estar ligados, o que pode inclusive queimar componentes do circuito. Isso é comum de acontecer quando o ponto em que você deve posicionar a ponta de prova está próximo a um outro ponto qualquer do circuito e ao colocar a ponta de prova sobre o ponto a ser medido você sem querer faz com que a ponta de prova una esses dois pontos, criando um curto-circuito entre eles. Mostramos esse problema na Figura 21.5.

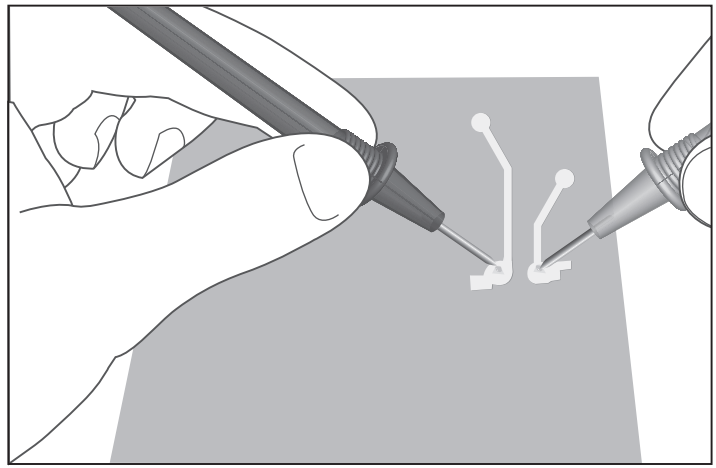


Figura 21.4: Medido a tensão entre dois pontos.

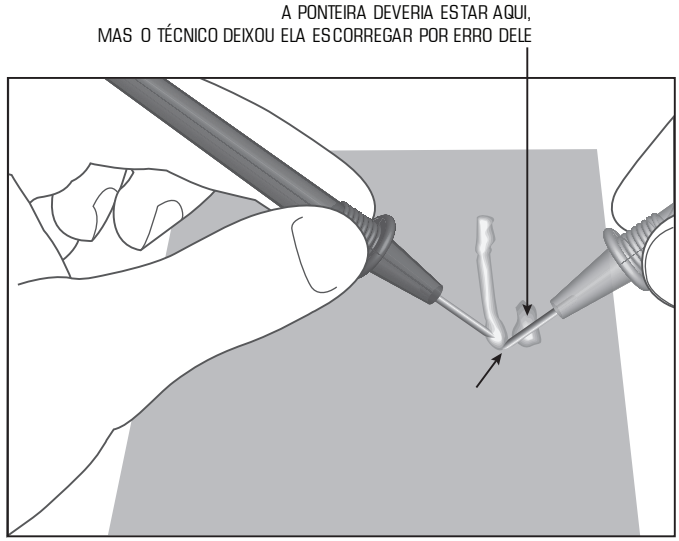


Figura 21.5: Cuidado para não encostar dois pontos com a ponta de prova!

Como você começará a medida a partir da escala mais alta do seu instrumento, mova a chave seletora para a escala que lhe permitirá visualizar o valor da tensão com a maior precisão possível.

Medida de Corrente

O multímetro deve ser instalado em série no ponto em que você deseja medir a corrente. Isso significa que você precisará literalmente abrir o circuito. *Com o circuito desligado*, abra o ponto onde você deseja medir a corrente. Por exemplo, se você quer medir a corrente que passa por um determinado componente, pode levantar um dos terminais desse componente e instalar o multímetro entre o terminal do componente e o ponto onde este componente estava originalmente conectado, como mostramos na Figura 21.6.

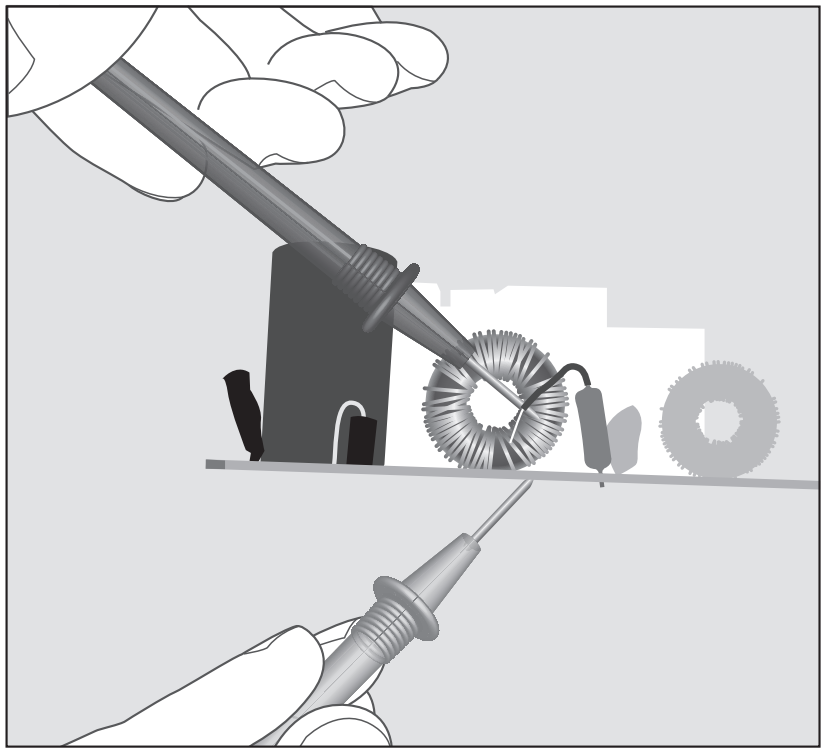


Figura 21.6: Medindo a corrente que passa por um componente.

Para medir a corrente você precisará ligar o circuito sendo analisado. Enquanto o circuito estiver ligado, você não poderá remover o multímetro do circuito, isto é, se as pontas de prova do multímetro deixarem de ter contato com o circuito por uma fração de segundo que seja, você poderá danificar componentes presentes no circuito sendo analisado.

A não ser que você tenha um ajudante, é impossível segurar as pontas de prova nos locais corretos e, ao mesmo tempo, ligar ou desligar o circuito sendo analisado. Por este motivo, na medida de corrente é preferível que, em vez de usar as pontas de prova tradicionais que acompanham o multímetro, você use cabos que tenham em sua extremidade garras do tipo "jacaré". Esse tipo de garra, mostrada na Figura 21.7, fica firmemente presa ao circuito ou componente e, desta forma, não há o perigo de você cortar o contato do multímetro com o circuito sendo analisado. É possível, ainda, que tenha de soldar um pedaço de fio no local onde você abriu o circuito para poder instalar esta garra.

Figura 21.7: Garra jacaré.

Após efetuar a medida da corrente, desligue o circuito e restaure-o à sua configuração original, fechando o circuito que você teve de abrir para poder inserir o multímetro.

Outras Medidas

Multímetros mais incrementados (e mais caros) poderão medir outras grandezas, tais como temperatura (através de uma ponta de provas apropriada), capacitância, indutância, frequência etc. Ou então você poderá comprar um equipamento dedicado à medida de uma grandeza que seu multímetro não seja capaz de medir (termômetro, capacímetro, frequencímetro etc.).

Se o seu multímetro puder medir capacitância e/ou indutância, você deverá efetuar o mesmo procedimento usado para medir resistências, isto é, removendo-se a peça do circuito (capacitor ou indutor) que você deseja medir.

No caso de medidas de frequência, o multímetro ou frequencímetro deverá estar conectado em paralelo ao ponto em que você deseja medir a frequência da forma de onda, ou seja, a instalação é feita como a de um voltímetro ou multímetro em escala de tensão.

A instalação de wattímetros (medidor de potência) deve ser feita entre a fonte de alimentação e a carga. Por exemplo, para medir a potência consumida por um circuito, você deverá ligar o wattímetro entre a fonte de alimentação do circuito e o circuito. Para medir a potência sendo entregue a um alto-falante, você deverá instalar o wattímetro entre a saída do amplificador (que, neste caso, será a fonte de alimentação do alto-falante) e o alto-falante (que será, nesse caso, a carga). Obviamente para medir a potência consumida por um aparelho elétrico, basta ligar o wattímetro entre o aparelho e a rede elétrica.

◆◆◆

Exercícios

1. Como deve ser instalado um multímetro para medir resistência?
2. Como dever ser instalado um multímetro para medir tensão?
3. Como deve ser instalado um multímetro para medir corrente contínua?

Capítulo 22
Osciloscópio

Introdução

O osciloscópio é um instrumento de medida que apresenta graficamente em uma tela o valor da tensão que está sendo lida por suas pontas de prova. O osciloscópio é o instrumento utilizado para medir o valor e a frequência de tensões alternadas, especialmente se a forma de onda a ser medida for diferente da senoidal (triangular, dente de serra ou quadrada, por exemplo). O osciloscópio também pode ser usado para medir valores de tensão contínua (um uso clássico é verificar se há ruído – chamado *ripple* – na tensão contínua, assunto que abordaremos no Capítulo 31). Na Figura 22.1 nós mostramos um osciloscópio típico.

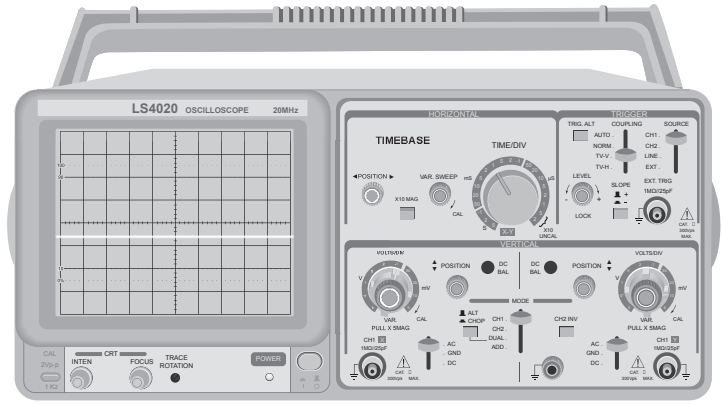


Figura 22.1: Osciloscópio.

A impedância padrão de um osciloscópio (resistência interna) é de 1 MΩ, dez vezes menor que a de um multímetro digital. Através do uso de uma ponta de prova multiplicadora por dez (x 10), a impedância é multiplicada por dez, indo para 10 MΩ. Essa ponta de prova faz com que a escala de leitura também seja multiplicada por dez. Assim, a escala de 1 V passa a valer 10 V com o uso dessa ponteira especial.

Osciloscópios são classificados basicamente de acordo com a frequência máxima que são capazes de mostrar com precisão em seu visor. Um osciloscópio de 25 MHz até consegue mostrar de maneira clara formas de onda com frequências acima de 25 MHz em sua tela, porém a amplitude do sinal será apresentada menor do que o seu valor real, fazendo com que você não consiga ler de forma precisa os valores apresentados por essas formas de onda.

Atualmente existem osciloscópios digitais, que, além de mostrarem a forma de onda, ainda a analisam, apresentando na tela os valores de pico, RMS, frequência, etc. de forma escrita.

É possível, ainda, usar um osciloscópio baseado em computador. Este tipo de equipamento é bem mais barato do que um osciloscópio avulso, pois ele traz somente uma interface para converter sinais analógicos em valores digitais, que serão analisados pelo computador, através do programa do osciloscópio. Fisicamente falando, este tipo de equipamento é apenas uma interface a ser instalada no computador, e a tela e botões do osciloscópio são apresentados na tela do computador. Esse tipo de equipamento apresenta duas desvantagens. A primeira é a necessidade de um computador para usá-lo, o que faz com que o equipamento não seja portátil. A segunda é que os equipamentos mais baratos apresentam baixa frequência máxima, e, portanto, podem não servir para determinadas aplicações.

Usando um Osciloscópio

A tela do osciloscópio é um gráfico, onde o eixo “y” representa tensão e o eixo “x”, tempo. O quanto cada quadrado da tela do osciloscópio representará dependerá de como o osciloscópio estiver configurado.

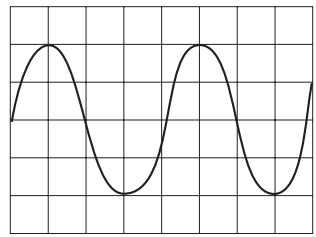


Figura 22.2: Visualizando uma forma de onda através de um osciloscópio.

Como o osciloscópio é usado para medir tensões, ele deverá ser instalado em paralelo aos pontos em que desejamos medir a tensão, ou seja, a instalação de um osciloscópio em um circuito é feita de maneira idêntica a de um voltímetro.

Apesar de ter vários botões e ajustes, o uso de um osciloscópio é bastante simples.

Os osciloscópios normalmente possuem mais de uma entrada, também chamada canal. Se você for usar somente um canal (que é o caso mais comum), posicione a chave seletora de canais (normalmente rotulada "Source") em "Ch1" e instale a ponta de prova do osciloscópio no conector marcado "Ch1".

O primeiro passo para se usar um osciloscópio é obviamente ligá-lo. Após ligar o osciloscópio, você precisará calibrá-lo. Essa calibragem visa colocar o eixo zero do traço feito pelo osciloscópio exatamente em cima do eixo zero da escala que há desenhada permanentemente na tela do osciloscópio. Para isso, devemos colocar a chave seletora de entrada do canal 1 na posição GND (essa chave normalmente possui três posições: AC, GND e DC). Em seguida, basta girar um potenciômetro marcado com uma seta na vertical (↕) até que a linha que está sendo traçada pelo osciloscópio na tela (normalmente verde ou azul) coincida com o eixo x central que há desenhado na tela do osciloscópio.

Agora o osciloscópio estará pronto para uso. Selecione se você irá medir uma tensão DC ou AC. A diferença é que, quando o osciloscópio estiver na escala AC, será inserido um capacitor em série com a entrada. Com isso, a tensão contínua será bloqueada e não será possível ler tensão contínua. Para você entender melhor, vamos supor uma forma de onda alternada flutuando sobre um nível de tensão contínua (offset). Na escala DC o osciloscópio mostra esse nível DC. Já na escala AC, o capacitor bloqueia esse nível DC e "força" o eixo da forma de onda como sendo o zero do eixo y da tela. Mostramos isso na Figura 22.3.

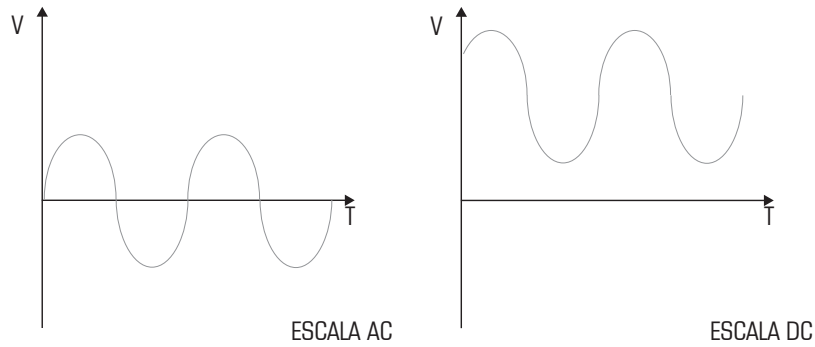


Figura 22.3: Diferença entre o uso das entradas AC e DC do osciloscópio.

Com o tempo você aprenderá as vantagens e desvantagens do uso de cada uma dessas escalas. Por ora, opte pela escala DC.

Os dois ajustes básicos de um osciloscópio são as chaves seletoras de volts por divisão (rotulada "V/div" ou "volts/div") e do período (segundos por divisão, rotulada "sec/div" ou "time/div"). A primeira regula o eixo y da tela e a segunda, o eixo x. Você deverá rodar a escala de volts por divisão até que a forma de onda a ser lida caiba de forma proporcional na tela, na vertical. Já a chave seletora de período deverá ser ajustada até que a forma de onda a ser lida caiba de forma proporcional na tela, na horizontal. A Figura 22.2 mostra um osciloscópio ajustado corretamente para a leitura da forma de onda.

Pode ser que a forma de onda caiba corretamente mas fique "correndo" na horizontal, isto é, a imagem não fique "parada". Nesse caso, você terá de rodar um potenciômetro chamado sincronismo (ou *trigger*) até que a forma de onda fique corretamente sincronizada, isto é, parada na tela.

Quando você tiver uma forma de onda completamente nítida parada na tela, poderá proceder à leitura. Vamos tomar como base a Figura 22.2. Se a chave seletora de volts/divisão estiver posicionada em 5 V, isso significa que a forma de onda da figura possui 10 Vp e 20 Vpp. A medida é simples: como a distância entre o pico máximo e o pico mínimo é de quatro divisões ("quadrados"), e como cada divisão vale 5 V, o valor da tensão de pico-a-pico é de 20 V. A distância entre o eixo x (zero) e o pico da onda é de duas divisões e, logo, o valor da tensão de pico é de 10 V. O valor da tensão RMS não tem como ser medido (exceto no caso de alguns osciloscópios digitais contendo esse recurso, que apresenta todos esses valores escritos diretamente sobre a tela do osciloscópio, ou no caso dos osciloscópios baseados em computador). Neste exemplo, a tensão RMS dessa forma de onda é de 7,07 V, já que a tensão RMS vale 70,7% da tensão de pico em formas de onda senoidais simétricas.

Já a frequência da forma de onda pode ser medida pela quantidade de divisões que o período possui, multiplicado pelo valor de segundos por divisão ajustado. Se para visualizarmos a forma de onda da figura a chave "time/div" estiver posicionada em 100 ms, isso significa que o período do ciclo completo, que possui praticamente quatro divisões, é de 400 ms. Ou seja, a forma de onda lida possui uma frequência de 2,5 Hz (basta lembrar que $f = 1/t$).

Em alguns casos, o início do ciclo da forma de onda não vai coincidir com o início de uma das divisões da tela, dificultando a leitura do período. Para casos como este, o osciloscópio tem um botão de ajuste com o desenho de uma seta vertical (↔) para que você possa movimentar a imagem para a esquerda e para a direita de forma que consiga fazer com que o início do ciclo "bata" com o início de uma das divisões, permitindo uma leitura mais fácil do período do ciclo.

Cada divisão do osciloscópio é normalmente subdividida com pequenos "traços". Normalmente quatro são usados, representando 20%, 40%, 60% e 80%. Se, por exemplo, uma forma de onda possuir como pico uma divisão e um "traço", significa que o pico possui 120% (1,2 x) o valor configurado em volts/divisão. Se o pico for de uma divisão e três "traços", isto significa que o

pico possui 160% (1,6 x) o valor configurado em volts/divisão. E assim sucessivamente. Demos como exemplo traços no eixo "y" (tensão), mas esta mesma ideia aplica-se no eixo "x" (tempo).

É claro que outros recursos poderão existir dependendo da marca e do modelo do osciloscópio, fugindo do escopo de nosso livro explicarmos todos os ajustes que você poderá encontrar.

Como dissemos, os osciloscópios normalmente possuem mais canais, tipicamente dois. Com mais de um canal é possível ver na mesma tela mais de uma forma de onda ao mesmo tempo. Há inúmeras aplicações onde esse recurso é muito importante. Por exemplo, para comparar as diferenças entre duas formas de onda de dois pontos diferentes de um mesmo circuito (como, por exemplo, medir a forma de onda da saída e compará-la com a forma de onda da entrada de um circuito amplificador). Os canais são independentes e, portanto, os ajustes de volts por divisão e segundos por divisão deverão ser feitos de maneira independente para cada canal.

Instalação

Como já explicado, por ser um instrumento de medida de tensão, osciloscópios devem ser instalados em paralelo ao local onde você deseja visualizar a forma de onda.

Diferentemente de multímetros, que vêm com duas pontas de prova idênticas variando apenas na cor (uma vermelha e uma preta), osciloscópios possuem apenas uma ponta de prova (ponteira) contendo dois contatos, um ao seu centro (equivalente à ponteira vermelha encontrada em multímetros) e outro através de um fio "pendurado" na ponta de prova (equivalente à ponteira preta encontrada em multímetros), normalmente dotado de uma garra do tipo "jacaré". Opcionalmente você pode remover completamente este fio "pendurado" e instalar um cabo no conector rotulado GND no osciloscópio como sendo o equivalente da ponteira preta.

Normalmente a ponteira usada por osciloscópios vem com um clipe dotado de uma mola, permitindo que a ponteira seja facilmente presa ao terminal de um componente por pressão. Esse clipe pode ser facilmente removido desatarraxando-o da ponta de prova.

Figura 22.4: Ponta de prova usada por osciloscópios.

Se a ponta de prova for do tipo multiplicadora (ver a introdução deste capítulo), haverá uma chave para você selecionar entre “x1” e “x10”.

◆◆◆

Exercícios

1. Observe a tela do osciloscópio da Figura 22.5. Esta é uma forma de onda contínua ou alternada? Qual é o valor da tensão? A configuração do osciloscópio, também descrita na parte inferior da figura, é a seguinte: 5 V por divisão e 10 μs por divisão

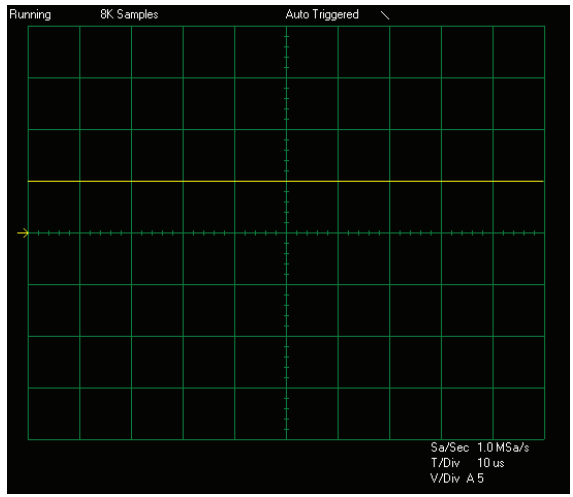


Figura 22.5: Qual é o valor desta tensão?

2. Observe agora a tela da Figura 22.6. Quais são os valores (aproximados) da tensão de pico, tensão de pico-a-pico, período e frequência desta forma de onda? A configuração do osciloscópio, também descrita na parte inferior da figura, é a seguinte: 0.02 V por divisão e 10 μs por divisão.

As imagens desses exercícios foram feitas com um osciloscópio Stingray DS1M12 da empresa USB Instruments, que é baseado em computador.

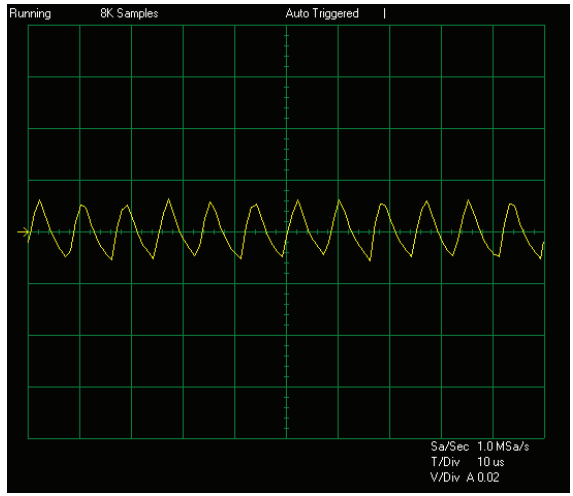


Figura 22.6: Quais são os parâmetros desta forma de onda?

3. Considere agora a tela da Figura 22.7. Quais são os valores (aproximados) da tensão de pico, período e frequência desta forma de onda? Configuração do osciloscópio: 5 V por divisão e 10 μs por divisão.

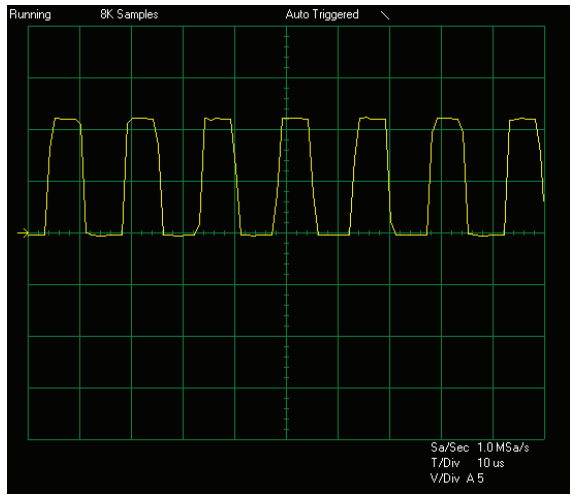


Figura 22.7: Quais são os parâmetros desta forma de onda?

Parte 5
Componentes Eletrônicos

Chegou a hora de estudarmos em detalhes o funcionamento dos principais componentes eletrônicos existentes! Nesta parte do livro, você aprenderá tudo o que precisa saber sobre os principais componentes eletrônicos que você encontrará em seu dia a dia, tais como resistores, capacitores, diodos, transistores e até mesmo circuitos integrados. Aproveitamos para explicar em detalhes as aplicações mais usuais desses componentes, com exemplos práticos.

Capítulo 23
Resistores

Introdução

Resistores são componentes eletrônicos que criam uma oposição à passagem da corrente elétrica, ou seja, criam uma resistência elétrica. Com isso, já estudamos o comportamento de resistores em circuitos eletrônicos no Capítulo 7.

Simbologia

A simbologia de resistores pode ser vista na Figura 23.1.

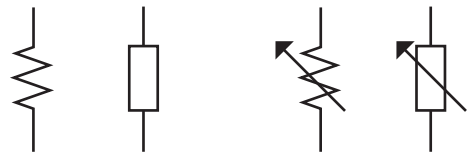


Figura 23.1: Simbologia de resistores.

Resistores Convencionais

Normalmente resistores são construídos à base de carvão (carbono) ou então à base de um fio enrolado em volta de um núcleo cerâmico. Este segundo tipo é também chamado *resistor de fio*. Resistores

de fio normalmente conseguem dissipar uma potência maior e são, portanto, usados em aplicações onde muita potência seja dissipada no resistor. Na Figura 23.2 vemos o aspecto físico de resistores.

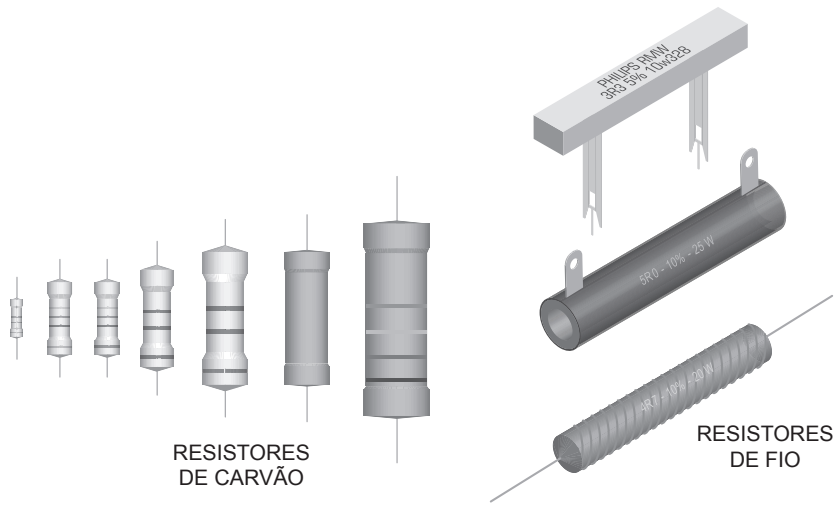


Figura 23.2: Resistores.

Potência

A potência elétrica que um resistor "gasta" é dissipada em forma de calor. Vimos que a quantidade de energia elétrica transformada por segundo chama-se potência. Assim, ao montar um determinado circuito, é extremamente importante saber qual será a potência dissipada por cada resistor do circuito, de modo a usarmos resistores de potência compatível. Se for usado um resistor de potência máxima menor do que ele terá de dissipar, ele se queimará (e inclusive sairá uma fumaça do resistor).

A potência máxima que um resistor é capaz de dissipar é dada pelo seu tamanho físico: quanto maior o tamanho físico de um resistor, maior a sua potência máxima, como mostramos na Figura 23.3. No caso de resistores de fio, sua potência máxima vem escrito em seu corpo, como você pode reparar na Figura 23.2.

Em lojas de componentes eletrônicos o tipo de resistor mais comum para venda no varejo é o de 1/8 W.

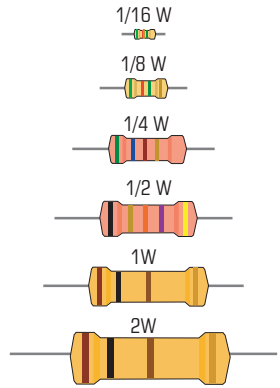


Figura 23.3: Potência de resistores.

Para ficar mais clara essa ideia, considere o circuito da Figura 23.4. Se R1 for igual a 1 kΩ e R2 for igual a 100 Ω, teremos que a potência dissipada por R1 será de 29,7 mW e a potência dissipada por R2 será de 2,97 mW. Se usarmos resistores de 1/8 W (125 mW) não teremos problema algum, já que a potência nominal de cada resistor será maior do que a potência que ele terá de efetivamente dissipar. Entretanto, se R1 e R2 fossem alterados para 10 Ω cada um, cada resistor dissiparia 900 mW (0,9 W). Nesse caso, um resistor de 1/8 W (125 mW) se queimaria; teríamos de usar resistores de pelo menos 1 W.

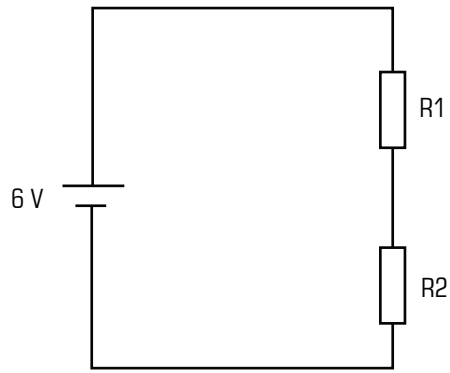


Figura 23.4: Exemplo de cálculo de potência (ver texto).

Código de Cores

O valor da resistência de resistores de carvão é marcado através de um código de cores, normalmente quatro anéis coloridos pintados ao redor do resistor (ver Figura 23.5). Já resistores de fio normalmente vêm com o valor de sua resistência escrito sobre eles (ver Figura 23.2).

O uso de um código de cores em vez de um valor impresso traz várias vantagens. Primeiro, como um resistor pode ser muito pequeno (especialmente os de 1/8 W e 1/16 W), a leitura de um valor de forma escrita poderia ser muito difícil sem o auxílio de uma lupa. Segundo, se um resistor fosse marcado de forma escrita em vez de usar um código de cores e ele já estivesse preso em um circuito (soldado em uma placa de circuito impresso, por exemplo), e se porventura o seu valor ficasse justamente posicionado para baixo, impedindo que nós lêssemos o seu valor, teríamos de dessoldar o resistor para saber o seu valor. Os anéis coloridos impedem que isso ocorra, já que o valor fica visível independentemente da posição em que o resistor esteja soldado a um circuito. E, terceiro, em caso de atrito onde um pequeno pedaço da parte externa do resistor seja descascada, é possível saber o valor do resistor pelo restante dos anéis; caso o valor fosse escrito e justamente a parte onde está escrito o valor fosse descascada, ficaríamos sem saber o valor do resistor.

O código de cores de resistores é universal e é também usado, com pequenas modificações, na identificação de valores de inúmeros outros componentes, tais como capacitores de poliéster e alguns tipos de diodo.

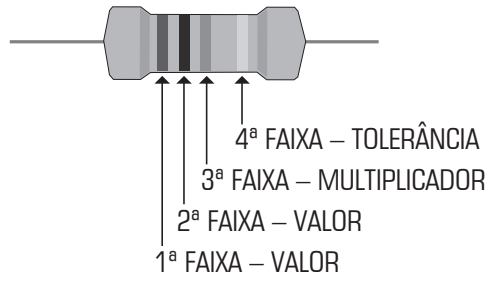


Figura 23.5: Código de cores de resistores.

As duas primeiras faixas indicam o valor da resistência. A terceira faixa indica o valor pelo qual o valor indicado nas duas primeiras faixas deve ser multiplicado. E a quarta faixa indica a tolerância do resistor. Distinguir a primeira faixa da última é relativamente simples: a última faixa normalmente possui um espaçamento diferente das demais faixas coloridas ou então a primeira

faixa está mais próxima de uma das extremidades do resistor do que a última faixa. Assim, não há como você se confundir na hora da leitura do valor de um resistor.

A Tabela 23.1 mostra o código de cores completo para resistores.

Tabela 23.1: Código de cores de resistores.

Cor	Valor	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	x 1	–
Marrom	1	x 10	± 1%
Vermelho	2	x 100	± 2%
Laranja	3	x 1.000	–
Amarelo	4	x 10.000	–
Verde	5	x 100.000	± 0,5%
Azul	6	x 1.000.000	± 0,25%
Lilás	7	x 10.000.000	± 0,1%
Cinza	8	x 100.000.000	± 0,05%
Branco	9	x 1.000.000.000	–
Dourado	–	x 0,1	± 5%
Prateado	–	x 0,01	± 10%
Sem cor	–	–	± 20%

Vamos supor um resistor com as seguintes cores: marrom, preto, vermelho e dourado. Seu valor será 10 (marrom e preto) · 100 (vermelho) = 1.000 Ω, com uma tolerância de 5%. A tolerância é o quanto o valor do resistor pode variar, para cima ou para baixo. Isto é, nem sempre o resistor terá o valor exato que há marcado sobre ele. Neste exemplo, uma tolerância de 5% indica que o resistor pode ter um valor entre 950 Ω e 1.050 Ω.

Outro exemplo: um resistor amarelo, lilás, amarelo e dourado. Seu valor é de 470 kΩ, com tolerância de 5%.

Alguns resistores de alta precisão possuem, em vez de quatro faixas coloridas, cinco. Nesse caso, as três primeiras faixas indicarão o valor, a quarta faixa o multiplicador e a quinta, a tolerância, seguindo os mesmos valores apresentados na tabela.

Alguns resistores antigos podem ter apenas três faixas. Nesse caso, a quarta faixa é "sem cor", indicando um resistor com tolerância de 20%.

Resistores com tolerância abaixo de 5% são classificados como de alta precisão e são necessários para circuitos onde o valor da resistência tem de ser exatamente o valor calculado. Na

maioria das aplicações, no entanto, uma pequena alteração no valor dos resistores não altera o funcionamento do circuito e, por isso, a maioria dos resistores vendidos em lojas de componentes eletrônicos possui tolerância de 5% ou 10%.

Como comentamos no Capítulo 7, muitas vezes a unidade ohm será representada pela letra R. Isso é muito comum em resistores de fio, como você pode observar na Figura 23.2. Isso ocorre por motivos históricos: máquinas de escrever eram incapazes de imprimir a letra grega ômega (Ω).

Em resistores com valores que possuam vírgula, esta normalmente é substituída pela unidade. Por exemplo, resistores de 2,2 Ω e 4,7 kΩ são normalmente vendidos como 2R2 e 4K7. Esse tipo de nomenclatura evita que a loja venda componentes com valores errados (um vendedor poderia não ver direito uma vírgula de uma caixa marcada 4,7 K e vender os resistores de 4,7 K como sendo de 47 K; usando a nomenclatura 4K7, evita-se esse tipo de confusão). Resistores de fio também seguem este esquema (ver Figura 23.2), pois, por conta das letras em tamanho reduzido impressas em seu corpo, você poderia facilmente não perceber a vírgula existente.

Valores Comerciais

É necessário entender que resistores são vendidos com determinados valores comerciais prestabelecidos. Os fabricantes de resistores não colocam no mercado resistores de todos os valores possíveis. Em vez disso, eles usam uma tabela de valores comerciais, mostrada na Tabela 23.2.

Essa tabela considera apenas as duas (ou três, no caso de resistores com cinco faixas) primeiras faixas coloridas do resistor (apesar de não usarem faixas coloridas, resistores de fio também seguem essa tabela). Com isso, a entrada "10" indica que os seguintes valores comerciais são possíveis: 0,1 Ω, 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ, 1 MΩ e 10 MΩ.

Os valores comerciais dependem também da tolerância do resistor. Por exemplo, resistores de 130 Ω (linha "13" da tabela) só existem com tolerância de 5%, mas não com tolerância de 10% e 20%.

O maior valor comercial existente é 22 MΩ.

Tabela 23.2: Tabela de valores comerciais de resistores.

Valor	5%	10%	20%
10	Sim	Sim	Sim
11	Sim	Não	Não
12	Sim	Sim	Não

(continua)

Valor	5%	10%	20%
13	Sim	Não	Não
15	Sim	Sim	Sim
16	Sim	Não	Não
18	Sim	Sim	Não
20	Sim	Não	Não
22	Sim	Sim	Sim
24	Sim	Não	Não
27	Sim	Sim	Não
30	Sim	Não	Não
33	Sim	Sim	Sim
36	Sim	Não	Não
39	Sim	Sim	Não
43	Sim	Não	Não
47	Sim	Sim	Sim
51	Sim	Não	Não
56	Sim	Sim	Não
62	Sim	Não	Não
68	Sim	Sim	Sim
75	Sim	Não	Não
82	Sim	Sim	Não
91	Sim	Não	Não

Desta forma, se você calcular que um determinado resistor de seu circuito tenha de ser de 4.600 Ω e chegar em uma loja de componentes eletrônicos pedindo um resistor desse valor, o vendedor irá orientá-lo informando que o valor comercial mais próximo desse é 4K7.

É claro que, para aplicações específicas, resistores com valores diferentes dos valores comerciais podem ser fabricados sob encomenda. Supondo que não é você, mas um fabricante de aparelhos de TV, que precise de resistores de 4,6 kΩ, ele pode chegar para o fabricante de resistores e pedir a fabricação de 500.000 resistores desse valor exclusivamente para ele, por exemplo. Apesar de isso ser possível, a maioria dos equipamentos eletrônicos usa resistores com valores comerciais, para facilitar a manutenção (no caso de necessidade de substituição, o técnico poderá facilmente comprar o resistor em qualquer loja de componentes eletrônicos).

Ligação

Nós já estudamos o que ocorre quando ligamos mais de um resistor em série ou em paralelo, no Capítulo 7. Apenas recapitulando, resistores em série têm seus valores somados, enquanto que no caso de resistores em paralelo o valor da resistência total será dado pelas fórmulas:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} + \ldots \quad (23.1)$$

$$R_{EQ} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \quad (23.2)$$

Resistores com valores iguais ligadas em paralelo possuem como resistência total o seu valor dividido pelo número de resistores. Dois resistores de 100 Ω em paralelo terão como resistência total 50 Ω, ao passo que três resistores de 100 Ω em paralelo terão como resistência total 33,33 Ω.

Em cálculos de resistores em série, o valor da resistência equivalente será sempre maior do que o valor do maior resistor incluso. Já em cálculos de resistores em paralelo, o valor da resistência equivalente será sempre menor do que o valor do menor resistor incluso. Essas dicas servem para você conferir, de uma forma rápida, se o resultado encontrado quando você efetuar cálculos está ou não dentro da faixa esperada. Caso não esteja, você saberá que o resultado dos seus cálculos está errado.

Na prática você pode acabar ligando resistores em série e em paralelo para aumentar ou diminuir o valor de um resistor necessário em um circuito. Quando você fizer isso, não se esqueça que terá de efetuar cálculos para ver se a potência máxima admissível dos resistores será compatível com a potência que será dissipada por cada um deles.

Terminações Resistivas

Circuitos digitais frequentemente precisam que uma série de resistores idênticos sejam conectados ao circuito, com todos esses resistores ligados à alimentação ("pull-up") ou ao terra ("pull-down") do circuito. Para facilitar, há empresas que fabricam esses resistores já soldados em um encapsulamento único, chamadas terminações resistivas. Os dois encapsulamentos mais usu-

ais chamam-se SIL (Single In-Line) e DIP (Dual In-line Package). Como o encapsulamento DIP é também muito usado por circuitos integrados, normalmente terminações resistivas vendidas nesse formato são pintadas de amarelo ou azul, pois assim você saberá que o componente não é um circuito integrado, já que circuitos integrados são normalmente pretos (existem circuitos integrados brancos e cinzas).

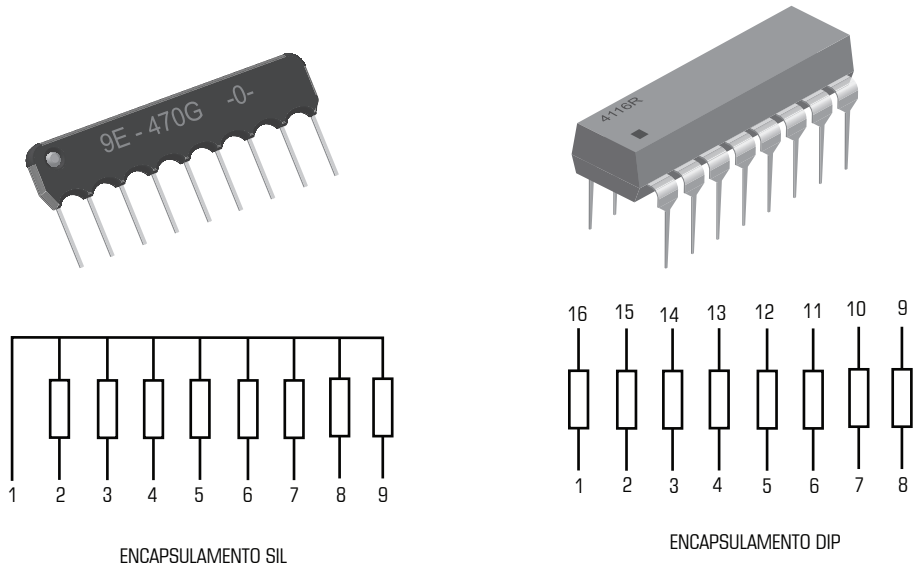


Figura 23.6: Terminações resistivas.

Em terminações resistivas com encapsulamento SIP, o primeiro terminal (aquele mais próximo de uma marcação de "pino 1" existente, normalmente um pequeno círculo desenhado no componente) normalmente é o terminal "comum", isto é, terminal que é ligado a todos os resistores. Já em terminações resistivas com encapsulamento DIP, normalmente os resistores estão disponíveis individualmente. Na Figura 23.6 desenhamos o diagrama esquemático desses componentes, onde fica claro como eles funcionam.

Resistores SMD

Dispositivos de montagem em superfície (SMD, Surface Mount Device) são componentes de tamanho físico bastante reduzido, que são soldados a placas de circuito impresso através de ferramentas robóticas. Este tipo de componente, portanto, não é voltado ao hobista.

Resistores SMD são dispositivos retangulares pretos, com dois terminais metálicos. Internamente ele é formado por um substrato cerâmico com um filme de óxido metálico. O comprimento deste filme determina a resistência do componente.

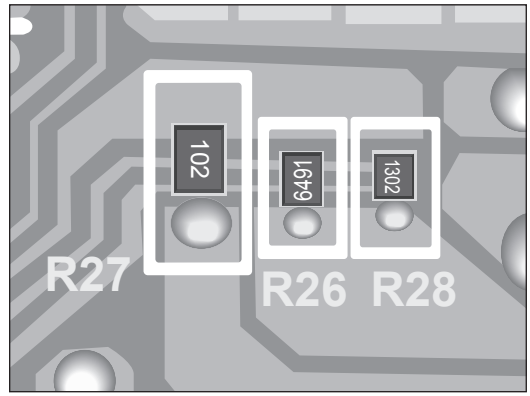


Figura 23.7: Resistores SMD.

A resistência de resistores SMD é informada através de um código contendo dois, três ou quatro números.

No caso de um código de dois números, a resistência é o valor estampado, por exemplo, um resistor SMD com o código "22" indica um resistor de 22 Ω.

Quando há três números, o terceiro número indica a potência de dez pela qual os dois primeiros números devem ser multiplicados. Por exemplo, "201" indica $20 \cdot 10^1$, ou seja, 200 Ω, "202" indica $20 \cdot 10^2$, ou seja, 2 kΩ, e "100" indica $10 \cdot 10^0$, ou seja, 10 Ω.

A letra "R" pode ser usada para indicar a vírgula decimal. Por exemplo, "4R7" indica um resistor de 4,7 Ω, e 0R22 ou R220 indica um resistor de 0,22 Ω.

Já componentes de alta precisão usam quatro números, onde o quarto é a potência de dez pela qual os dois primeiros números devem ser multiplicados. Assim, um componente rotulado como "2102" indica $210 \cdot 10^2$, ou seja, 21 kΩ, e um componente rotulado como "4420" indica $442 \cdot 10^0$, ou seja, 442 Ω.

Resistores SMD são muito parecidos com capacitores SMD. Uma maneira prática de saber se um componente SMD de dois terminais é um capacitor ou resistor é localizar o número do componente dentro do circuito, isto é, o número decalcado próximo a ele na placa de circuito

impresso do aparelho. Se o número do componente começar com “R”, isto significa que ele é um resistor, ao passo que se ele começar com “C”, isto indica que ele é um capacitor.

Potenciômetros

Potenciômetros são resistores variáveis também chamados *reostatos*. Sua função é variar o valor da resistência em seus terminais dependendo da posição de um cursor central. A sua aparência física nós vemos na Figura 23.8. Nessa figura, o componente na extrema esquerda é um potenciômetro “normal” enquanto que os demais componentes são potenciômetros em miniatura, também chamados *trimpot*. Interessante notar que trimpot era o nome comercial de uma linha de potenciômetros em miniatura de um determinado fabricante, mas técnicos acabaram apelidando qualquer potenciômetro em miniatura usando o mesmo nome (mesma coisa que ocorre com “gilete”, por exemplo).

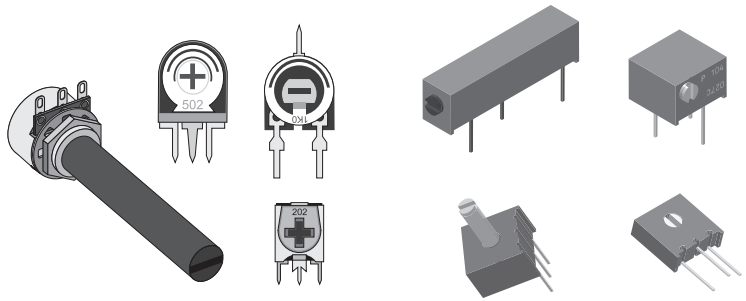


Figura 23.8: Potenciômetros.

Os potenciômetros são largamente usados em componentes eletrônicos. O controle de volume de aparelhos de som e ajustes de aparelhos de TV antigas são efetuados através de potenciômetros. Normalmente trim-pots são usados para efetuar ajustes internos dentro do aparelho eletrônico, ajuste este que normalmente não queremos disponibilizar ao usuário do aparelho.

Os potenciômetros normalmente possuem três terminais. Os dois terminais da extremidade oferecem uma resistência fixa, cujo valor é estampado sobre o corpo do potenciômetro. Já o terminal do meio é ligado a um cursor central e a resistência entre o terminal do meio e os outros dois terminais varia de acordo com a posição do cursor central. Se o botão do potenciômetro estiver totalmente girado para a esquerda, a resistência entre o terminal da esquerda e o terminal central será de zero ohm, enquanto que a resistência entre o terminal central e o terminal da direita será o valor máximo (o valor estampado no corpo do potenciômetro); ver Figura 23.9 para entender. Na medida em que giramos o potenciômetro no sentido horário, a resistência

entre o terminal da esquerda e o terminal central vai aumentando, enquanto que a resistência entre o terminal central e o terminal da direita vai diminuindo.

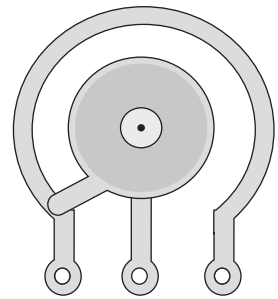


Figura 23.9: Funcionamento interno de um potenciômetro.

O valor estampado no corpo do potenciômetro pode estar representado diretamente em ohms ou então pode ser representado através de um número de três dígitos, onde o terceiro dígito é a potência de dez pela qual os dois primeiros dígitos precisam ser multiplicados. Por exemplo, um potenciômetro marcado "502" indica $50 \cdot 10^2$, ou seja, 5 kΩ. Ver tópico *Resistores SMD* para mais exemplos.

Existem dois tipos de potenciômetro: lineares e logarítmicos. Nos potenciômetros lineares, o valor da resistência cresce (ou diminui) linearmente à medida que giramos o botão do potenciômetro. Ou seja, se você posicionar o potenciômetro exatamente no meio do seu cursor, terá a metade da sua resistência, enquanto que se você girar apenas ¼ de seu curso, terá ¼ da sua resistência estampada entre o primeiro terminal e o terminal central, enquanto terá ¾ da sua resistência estampada entre o terminal central e o terceiro terminal. Ou seja, a resistência presente no terminal central é diretamente proporcional à posição do cursor do potenciômetro.

Já nos potenciômetros logarítmicos, o valor da resistência cresce (ou diminui) em uma escala logarítmica, e não linear. Com isso, o valor da resistência não é proporcional à posição do cursor do potenciômetro. Na Figura 23.10 nós traçamos um gráfico comparando a curva de um potenciômetro linear à curva de um potenciômetro logarítmico. Potenciômetros logarítmicos são usados no controle de volume de amplificadores. Como o nosso ouvido não responde de uma forma linear, se usarmos um potenciômetro linear para controlar o volume, irá ocorrer de o volume aumentar pouco na maior parte do potenciômetro e, ao chegar ao final de seu curso, o volume aumentar muito. É por isso que os potenciômetros com escala logarítmica existem: para que o controle de volume seja efetuado gradualmente ao longo do potenciômetro.

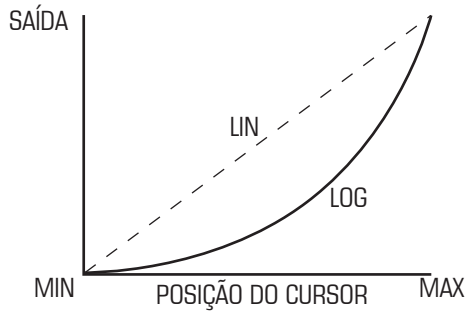


Figura 23.10: Escala linear vs. logarítmica.

A pista resistiva do potenciômetro, assim como os resistores de uma forma geral, pode ser feita à base de carvão ou de fio. Os potenciômetros de fio são recomendados para aplicações que exijam uma alta dissipação de potência.

Resistor Dependente de Luz (LDR, Light Dependent Resistor)

O resistor dependente de luz (LDR, Light Dependent Resistor) é um resistor que varia sua resistência de acordo com a incidência de luz. Há inúmeras aplicações para um LDR como, por exemplo, sensores de luminosidade. Note que, sendo um componente analógico, esse componente não só diz se há ou não luz sobre ele, mas o quanto de luz há; pequenas variações na intensidade da luz irão provocar pequenas variações no valor da resistência, permitindo, assim, sabermos exatamente o quanto de intensidade luminosa há sobre um LDR. Na Figura 23.11 nós vemos o aspecto físico de um LDR.

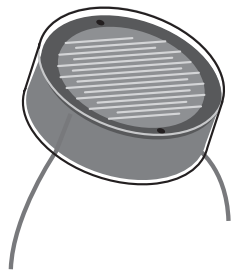


Figura 23.11: LDR.

Termistores

Um termistor é um resistor cuja resistência varia em função da temperatura aplicada sobre ele. A aplicação típica de um termistor é como a de um sensor térmico. Diversos aparelhos que possuem componentes que não podem passar de uma determinada temperatura utilizam um termistor conectado a um circuito de proteção. Assim, se o componente exceder uma determinada temperatura, o circuito é automaticamente desligado, como proteção. Alguns circuitos, como fontes de alimentação para computadores, podem usar esse componente para controlarem a velocidade de rotação de uma ventoinha de acordo com a temperatura interna do circuito.

Assim como o LDR, a resistência do termistor varia gradualmente de acordo com a temperatura. Como há uma correlação exata entre a temperatura aplicada e a resistência obtida, é possível construirmos um termômetro eletrônico a partir de um termistor.

Existem dois tipos de termistores: NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient). No NTC, a resistência varia de forma inversa em relação à temperatura, isto é, quanto maior for a temperatura, menor será a resistência. No PTC, a resistência varia positivamente de acordo com a temperatura, isto é, quanto maior for a temperatura, maior será a resistência. O PTC também é chamado posistor.

Na Figura 23.12 você confere os aspectos físicos mais comuns de termistores.

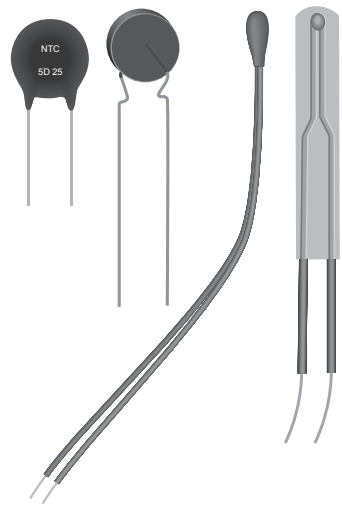


Figura 23.12: Termistores.

Varistores

Varistores são resistores que variam sua resistência em função da tensão aplicada em seus terminais. Desta forma, esses componentes não seguem a Lei de Ohm e, por isso, são considerados componentes não-ôhmicos. Eles são também chamados de VDR (Voltage Dependent Resistor). O tipo mais comum de varistor é o MOV (Metal-Oxide Varistor).

Aplicação

Quando é aplicada uma tensão abaixo da tensão de disparo (V_{TH}) do varistor sobre seus terminais, o componente apresenta alta resistência. Assim que a tensão de disparo é atingida, sua resistência cai, fazendo com que a tensão sobre seus terminais seja mantida no valor da sua tensão de disparo.

Assim, o principal uso de varistores é como circuito de proteção contra picos de tensão oriundos da rede elétrica, e para tal eles precisam ser instalados em paralelo à mesma.

Varistores são classificados de acordo com a tensão máxima suportada de forma contínua e a energia que ele é capaz de dissipar, dada em joules. Um joule equivale a um watt-segundo, ou seja, a dissipação de um watt durante um segundo. Assim, um varistor de 4,2 joules significa que ele é capaz de dissipar 4,2 W por um segundo. Varistores são usados para eliminar picos (transientes) da rede elétrica, picos esses que duram frações de segundo. Assim, esse componente é capaz de dissipar 42 kW durante um pico de 100 μs. É importante entender que essa energia dissipada é referente ao pico (transiente) vindo da rede elétrica, e não a potência sendo consumida pelo aparelho.

Varistores são oficialmente projetados para dissiparem picos no formato apresentado na Figura 23.13. Essa forma de onda é chamada 8 μs / 20 μs. Note que a barra não indica uma divisão, mas apenas uma separação. Outro pico comum é o 10 μs / 1000 μs. No documento técnico do componente haverá descrito qual é o pico usado pelo fabricante para rotular seu componente.

A desvantagem dos varistores é que eles "gastam" com o tempo, ou melhor dizendo, a cada descarga de transientes seu material interno é "usado". Os cálculos feitos anteriormente assumem que o varistor será usado uma única vez. Ou seja, se o varistor realmente dissipasse o pico de tensão do nosso exemplo, ele seria imediatamente "gasto", tornando-se inoperante. Com isso, a dissipação energética de um varistor diz, na realidade, a sua vida útil, ou quantas vezes o componente pode ser usado.

Aparelhos chamados filtros de linha são classificados de acordo com a energia máxima suportada, dada em joules, porque seu componente principal é o varistor. Um filtro de linha com uma maior capacidade de energia indica que ele suportará picos de maior intensidade, picos

de maior duração e terá uma vida útil maior do que aparelhos que usam varistores de menor dissipação energética.

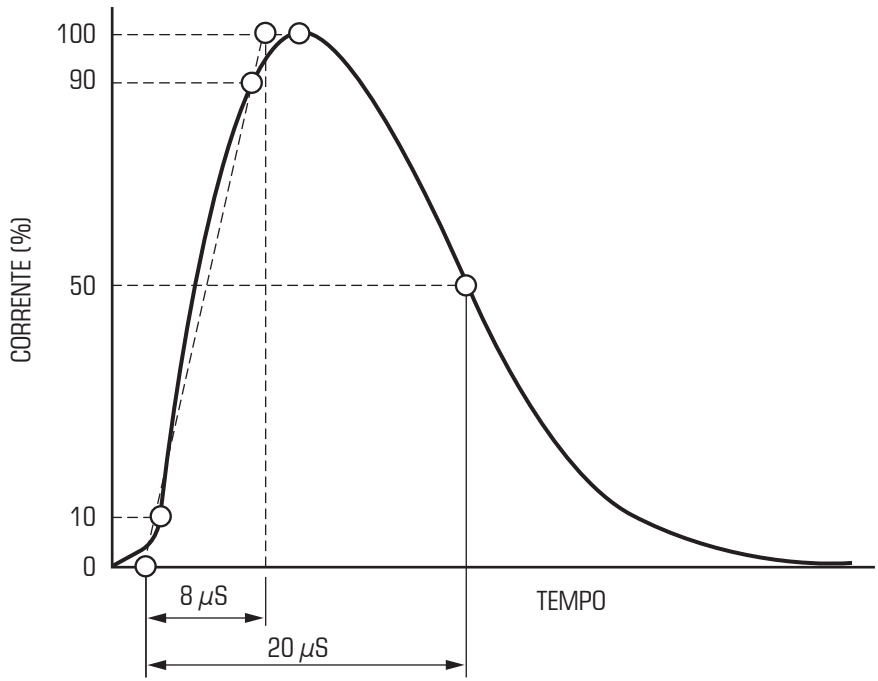


Figura 23.13: Pico de corrente (transiente).

Aspecto Físico

Fisicamente falando, varistores são muito parecidos com capacitores cerâmicos e termistores. Uma maneira prática de se descobrir se um componente é um capacitor cerâmico, um termistor ou um varistor é observando o número do componente dentro do aparelho onde ele está instalado, isto é, o valor decalcado próximo ao componente na placa de circuito impresso do aparelho. Capacitores irão começar com "C", enquanto que termistores começam com "TH" e varistores começam com "MOV" ou "VD".

Figura 23.14: Varistor.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é o valor de um resistor com listras laranja, cinza, vermelho e dourado?
2. Qual é o valor de um resistor com listras marrom, preto, verde e prata?
3. Qual é o código de cores de um resistor de 10 kΩ com 10% de tolerância?
4. Qual é o código de cores de um resistor de 470 kΩ com 5% de tolerância?
5. Considere o circuito da Figura 23.15. O resistor R3 é de 1/8 W. Ele funcionará corretamente ou se queimará? Por quê?

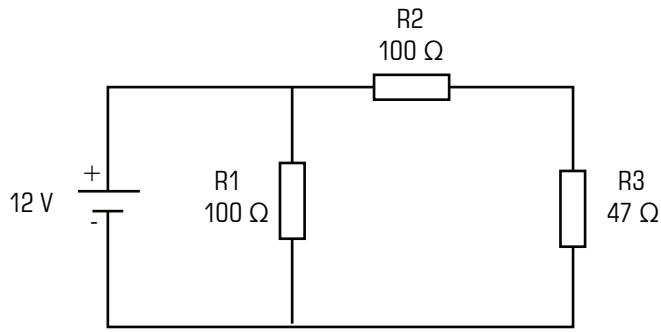


Figura 23.15: Cálculo de potência.

6. Quais são os valores dos resistores da Figura 23.7?
7. Qual é a potência máxima que um varistor rotulado como sendo de 5,2 J pode dissipar durante um pico de 1 ms, assumindo que ele é um componente novo e que nunca foi usado?

Capítulo 24
Capacitores

Introdução

Capacitores (que antigamente eram chamados de condensadores) são componentes eletrônicos que possuem duas placas metálicas paralelas (por isso o símbolo do capacitor é formado por dois traços paralelos). Eventualmente essas placas podem estar enroladas, como se fosse um rocambole. Quando aplicamos tensão elétrica sobre essas duas placas (isto é, ligamos essas placas em uma fonte de alimentação), uma fica carregada positivamente e a outra, negativamente (ver Figura 24.1). Ao removermos a tensão (isto é, removermos a fonte de alimentação), as cargas continuarão lá nas placas do capacitor. Isso ocorrerá porque como cargas elétricas de sinais opostos se atraem, as cargas positivas que estão de um lado, em uma das placas, irão ser atraídas pelas cargas negativas, que estão do outro lado, na outra placa.

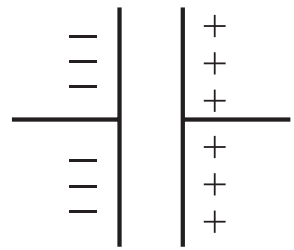


Figura 24.1: Funcionamento de um capacitor.

Ou seja, o capacitor armazena carga elétrica em seu interior. É claro que o capacitor não fica carregado para sempre; ele vai se descarregando sozinho ao longo do tempo. Na Figura 24.2 nós vemos curvas clássicas de carga e descarga de capacitores. Como você pode reparar, capacitores se carregam rapidamente e se descarregam lentamente.

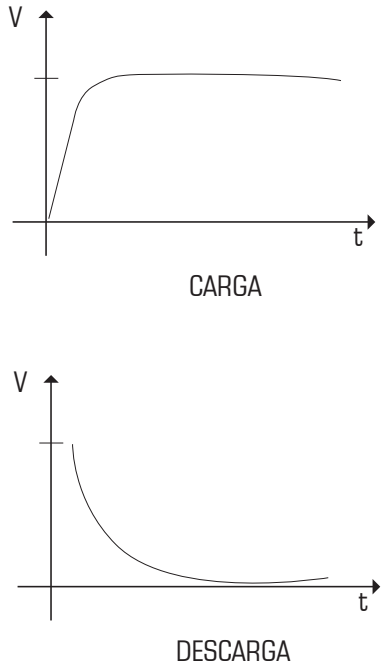


Figura 24.2: Curvas de carga e descarga clássicas de capacitores.

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de tensão contínua V, ele armazena uma certa quantidade de carga elétrica q. A capacitância de um capacitor é a relação entre q e V, ou seja:

$$C = \frac{q}{v} \qquad (24.1)$$

Isso significa que, quanto maior a capacitância de um capacitor, maior a carga que ele vai armazenar quando ligado a uma certa tensão. Também notamos pela equação que a tensão entre seus terminais depende da carga armazenada.

Caso, depois de carregado, o capacitor seja ligado a um resistor, por exemplo, ele vai se descarregar por este, com uma corrente que pode ser calculada pela equação 4.2 (I = V / R). Na medida em que a carga armazenada diminui, a tensão diminui proporcionalmente. Com isso, a corrente de descarga também diminuirá. Por isso a curva de descarga (Figura 24.2) não é uma reta e sim uma exponencial negativa.

Quanto maior for a *capacitância* de um capacitor (isto é, a sua capacidade de armazenar cargas elétricas), mais tempo ele demorará para se descarregar. A capacitância é medida em uma unidade chamada farad e abreviada com F. Assim, um capacitor de 10 μF armazena maior quantidade de carga elétrica do que um capacitor de 10 nF. Os capacitores normalmente têm capacitância na ordem de μF para baixo (nF e pF).

São três fatores que influenciam na capacitância de um capacitor: a área de suas placas, a distância entre elas e o material usado entre as placas. Este material é chamado *dielétrico*. Em nossas explicações anteriores sobre o funcionamento dos capacitores estávamos assumindo que o dielétrico era o ar – aliás, um péssimo dielétrico. Capacitores usam como dielétrico cerâmicas especiais ou determinados materiais químicos, enquanto que as placas normalmente são feitas de alumínio. Alguns capacitores – como os eletrolíticos – possuem várias folhas de alumínio intercaladas e enroladas, como se fosse um rocambole, aumentando a capacitância do capacitor.

Os capacitores são classificados de acordo com o material usado em sua fabricação. Os tipos de capacitores mais comuns que encontramos são os eletrolíticos, os de tântalo, os de poliéster e os cerâmicos. Contudo, é bom lembrar que esses são apenas alguns dos vários tipos de capacitor que você pode encontrar em circuitos, sobretudo os mais antigos. Antigamente eram comuns capacitores de papel (isto é, o seu dielétrico era feito de papel) e capacitores a óleo, tipos não mais usados e que não estaremos abordando neste livro.

Todo capacitor possui uma tensão máxima de carga. Se tentarmos armazenar mais carga do que um capacitor suporta, ele literalmente explodirá.

Para uma explicação mais aprofundada da teoria de funcionamento de capacitores, leia o Capítulo 8.

Simbologia

Símbolos usados por capacitores podem ser vistos na Figura 24.3. Quando o componente for polarizado, haverá indicação de polo positivo e polo negativo, que pode ser feita através da adição dos sinais de "+" e "-", ou então usando um símbolo onde uma das linhas foi alterada

de forma a indicar polaridade. O símbolo onde uma das linhas foi curvada para indicar o polo negativo é o mais usado.

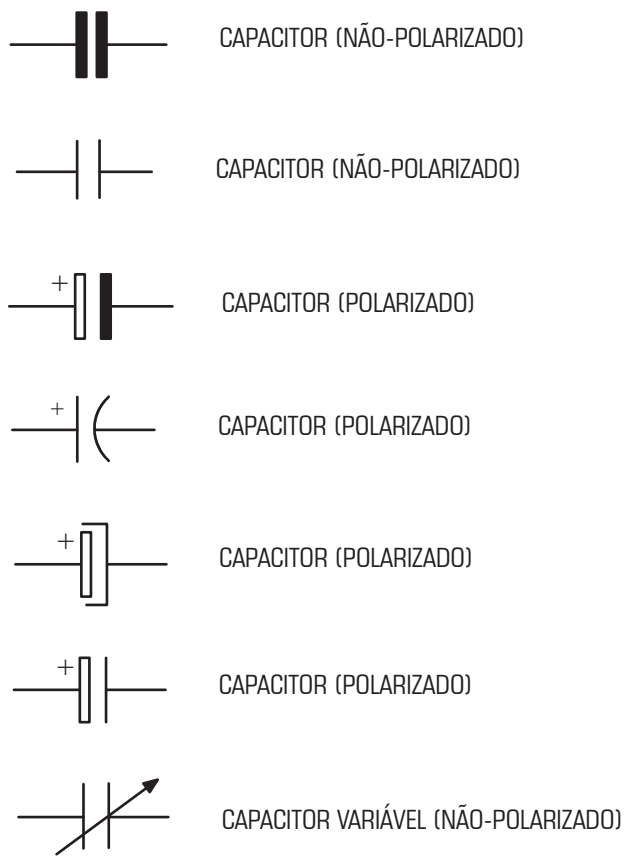


Figura 24.3: Simbologia usada por capacitores.

Aplicações

O uso mais comum de capacitores é como filtro, mas eles são também amplamente usados em circuitos osciladores (geradores de forma de onda) e também em circuitos de sintonia (que não deixam de ser um tipo de filtro).

Filtros

Como vimos no Capítulo 8, capacitores bloqueiam a tensão contínua, funcionando como um circuito aberto para esta, enquanto que deixam passar a tensão alternada, oferecendo, no entanto, uma oposição à passagem da corrente elétrica chamada *reatância capacitiva*, que varia de acordo com a capacitância do capacitor e com a frequência da forma de onda alternada.

Dessa forma, a aplicação mais tradicional de capacitores é como filtros, como mostra a Figura 24.4. Supondo uma tensão contínua que está com pequenas variações (ruído), o capacitor irá jogar para o terra o componente alternado dessa tensão, enquanto que só restará o componente contínuo.

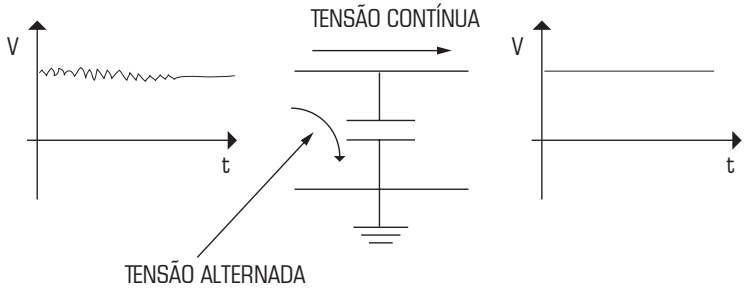


Figura 24.4: Usando um capacitor como filtro.

Outro uso clássico de capacitores é na conversão de tensão alternada em tensão contínua, como explicaremos melhor no Capítulo 31. Nesse caso, a tensão de entrada é uma tensão pulsante. O capacitor se carregará no pico da tensão e, quando a tensão de entrada for abaixando, o capacitor começará a se descarregar, formando uma curva de descarga como vimos anteriormente na Figura 24.2, até carregar-se novamente no próximo pico da tensão de entrada (ver Figura 24.5). Com isso, na saída do circuito, a forma de onda será a apresentada na Figura 24.5. A tensão da saída variará para mais ou para menos dependendo da capacitância do capacitor – já que o tempo de descarga depende da capacitância do capacitor.

A oscilação que vemos na forma de onda presente após o capacitor é chamada *ripple* e voltaremos a falar sobre ela no Capítulo 31. É importante que você saiba que essa oscilação é inversamente proporcional à capacitância do capacitor. Isto é, quanto maior o valor do capacitor, menor é a oscilação. Observe também que a forma de onda obtida após o capacitor é justamente a sua curva de descarga.

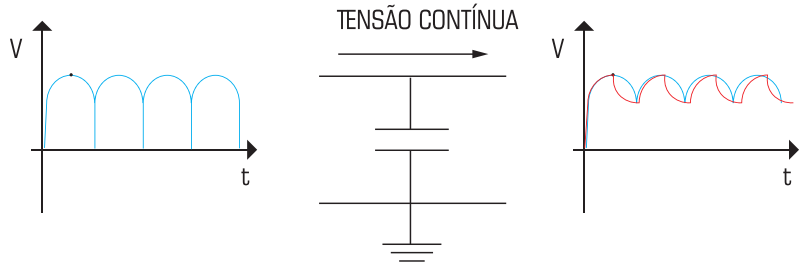


Figura 24.5: Usando um capacitor como filtro em fontes de alimentação.

Na Figura 24.6 vemos mais um exemplo de uso de um capacitor como filtro. Supondo uma tensão alternada flutuando sobre um nível de tensão contínua, o capacitor bloqueará esse nível contínuo, deixando passar somente a tensão alternada. Neste caso, o capacitor será usado para "zerar" o *offset* de tensão contínua existente na forma de onda da entrada.

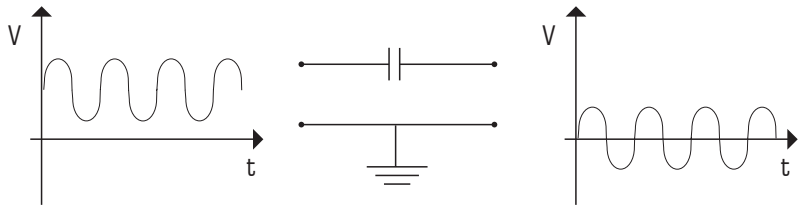


Figura 24.6: Usando um capacitor para bloquear a tensão contínua.

Como já estudamos, a reatância capacitiva é uma função que envolve a frequência da tensão alternada e a capacitância do capacitor. Com isso, é possível descobrirmos a partir de qual frequência a reatância passa a ficar alta demais ou baixa demais de acordo com o valor do capacitor. Em outras palavras, podemos definir valores de capacitores para criarmos filtros que deixem passar todas as frequências até uma "frequência-limite" (filtro conhecido como *passa-baixa*, pois deixa passar todas as frequências abaixo de uma determinada frequência) ou então que bloqueie todas as frequências até uma "frequência-limite" (filtro conhecido como *passa-alta*, pois só deixa passar as frequências acima de uma determinada frequência). Na Figura 24.7 vemos graficamente o funcionamento desse tipo de filtro.

Esse tipo de filtro é muito usado em caixas de som, por exemplo. Como o alto-falante para agudos (tweeter) só reproduz sons agudos (frequências altas), é colocado um filtro passa-alta (um capacitor em série com o alto-falante) para que somente frequências altas sejam enviadas para o alto-falante.

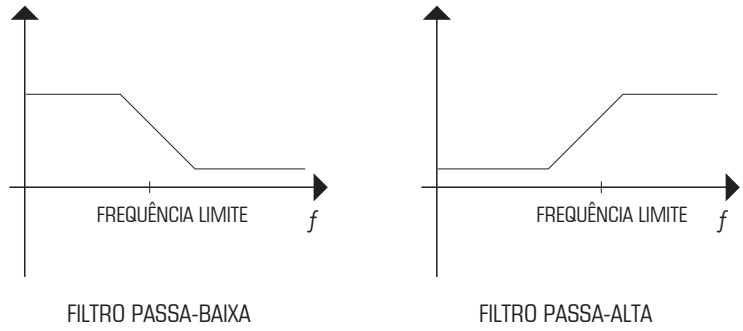


Figura 24.7: Filtros.

Circuito de Sintonia

Vimos no Capítulo 8 como um capacitor pode ser usado como um filtro passa-faixa, isto é, um filtro que seleciona somente uma frequência dentro de várias frequências disponíveis. Isso é possível usando um capacitor em conjunto com uma bobina e atingindo-se a frequência de ressonância do conjunto. Para uma explicação mais detalhada sobre a teoria dessa aplicação, leia o tópico *Ressonância*, do Capítulo 8.

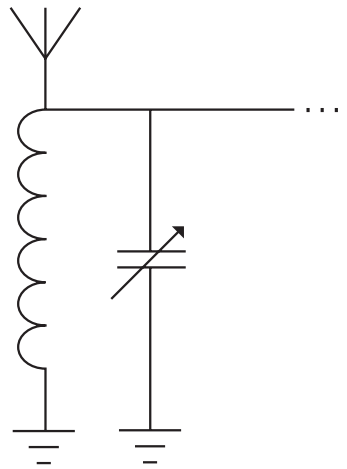


Figura 24.8: Circuito de sintonia usado por rádios.

Um exemplo clássico desse tipo de aplicação é o circuito sintonizador de um rádio. Nele selecionamos somente uma frequência dentro das várias que estão sendo recebidas simultaneamente pela antena do rádio. Na Figura 24.8 nós damos uma rápida olhada no circuito clássico de sintonia de um rádio. Nele há um capacitor variável em paralelo com uma bobina. Através do capacitor variável (que é o botão que muda as estações em um rádio) alteramos a frequência de ressonância do circuito e, com isso, selecionamos outra frequência (isto é, outra estação de rádio) para deixar passar para o restante do circuito.

Osciladores

Em circuitos de tensão contínua, capacitores normalmente são usados em circuitos osciladores, isto é, circuitos para gerarem uma determinada forma de onda automaticamente. Com um capacitor podemos facilmente gerar um oscilador de forma de onda dente de serra, já que a curva típica de carga e descarga de um capacitor gera essa forma de onda. Exemplos práticos de uso de osciladores incluem circuitos pisca-pisca (fazer uma lâmpada ou LED ficar acendendo e apagando – ver Capítulo 34) e diversos circuitos para a produção de efeitos sonoros, tais como sirenes.

Ligação

A ligação de mais de um capacitor em série ou em paralelo produz um efeito contrário ao da ligação de resistores em série e em paralelo. Quando ligamos capacitores em paralelo, a capacitância total será dada pela soma dos capacitores e todos eles ficarão submetidos à mesma tensão. Já quando ligamos capacitores em série, todos eles armazenarão a mesma quantidade de carga elétrica e o valor da capacitância total (C_{TOTAL}) será dado pela fórmula:

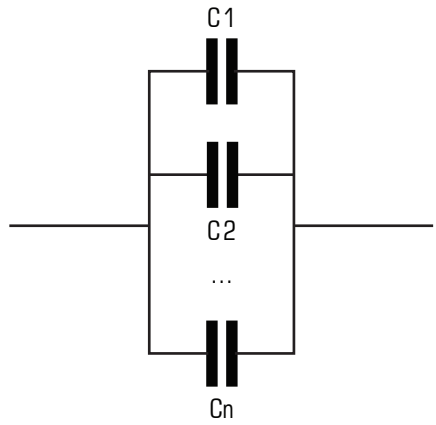
$$\frac{1}{C_{TOTAL}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} + \frac{1}{C4} + \ldots \qquad (24.2)$$

Uma fórmula mais prática, mas que só calcula a capacitância total entre dois capacitores, é:

$$C_{TOTAL} = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} \qquad (24.3)$$

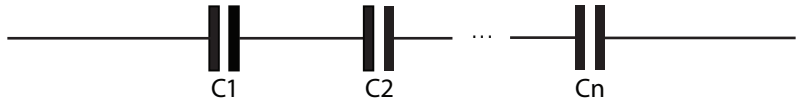
No caso de capacitores polarizados conectados em paralelo, você deverá ligar o terminal positivo de um capacitor ao terminal positivo do outro, e o terminal negativo de um capacitor ao terminal negativo do outro, da mesma forma que você liga pilhas em paralelo. Já no caso de capacitores polarizados conectados em série, você deverá ligar o terminal positivo de um capacitor ao terminal negativo do outro, da mesma forma que você liga pilhas em série.

Nas Figuras 24.9 e 24.10 nós resumimos esse assunto.



$$C_{TOTAL} = C1 + C2 + ... + Cn$$

Figura 24.9: Capacitores em paralelo.



$$\frac{1}{C_{TOTAL}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + ... + \frac{1}{Cn}$$

$$C_{TOTAL} = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}$$

Figura 24.10: Capacitores em série.

Em cálculos de capacitores em paralelo, o valor da capacitância total será sempre maior do que o valor do maior capacitor incluso, enquanto que, em cálculos de capacitores em série, o valor da capacitância total será sempre menor do que o valor do menor capacitor incluso. Essa dica serve para você conferir, de uma forma rápida, se o resultado encontrado quando você efetuar cálculos estão ou não dentro da faixa esperada. Caso não esteja, você saberá que o resultado dos seus cálculos está errado.

Um detalhe importante que deve ser observado na ligação em série e paralelo de capacitores é o limite de tensão. No caso de capacitores conectados em paralelo, a tensão máxima será dada pelo capacitor com o menor limite de tensão. Assim, se você instalar um capacitor de 400 V em paralelo com um de 250 V, o limite de tensão total será de 250 V.

Já no caso da ligação de dois capacitores em série, a tensão aplicada sobre os dois capacitores será dividida entre eles e inversamente proporcional à capacitância de cada capacitor. No caso de dois capacitores com mesmo valor de tensão máxima ligados em série o cálculo é simples: basta multiplicar o valor da tensão máxima por dois. Assim, dois capacitores de 400 V ligados em série passarão a suportar uma tensão máxima de 800 V. Desta forma, a conexão de capacitores em série pode servir para criar um capacitor equivalente com um maior limite de tensão.

No caso de capacitores com tensões máximas diferentes, o cálculo é um pouco mais complicado, pois a tensão aplicada sobre os dois capacitores será dividida proporcionalmente à capacitância de cada capacitor. A tensão que será aplicada sobre cada capacitor pode ser calculada modificando-se a fórmula do divisor de tensão (V_T é a tensão total aplicada sobre os dois capacitores):

$$V_{C1} = \frac{V_T}{C1 + C2} \cdot C2 \tag{24.4}$$

$$V_{C2} = \frac{V_T}{C1 + C2} \cdot C1 \tag{24.5}$$

Sabendo o valor dos capacitores e suas tensões máximas, você poderá aplicar essas duas fórmulas para descobrir o valor máximo que será suportado pelos dois capacitores conectados em série. Para isso, você deverá calcular o valor de V_T nas duas fórmulas e considerar o menor valor de V_T encontrado, substituindo-se V_{C1} ou V_{C2} pela tensão rotulada do capacitor. Ou seja, para o primeiro capacitor, teremos:

$$V_T = \frac{V_{C1} \cdot (C1 + C2)}{C2} \tag{24.6}$$

e, para o segundo capacitor:

$$V_T = \frac{V_{C2} \cdot (C1 + C2)}{C1} \quad (24.7)$$

Por exemplo, supondo que você tenha um capacitor de 220 nF x 400 V e um capacitor de 680 nF x 250 V conectados em série, através da primeira fórmula você encontrará que V_T pode ter até 529,4 V, enquanto que através da segunda fórmula você encontrará que V_T pode ter até 1.022,7 V. Como o menor valor encontrado é 529,4 V, temos então que a tensão máxima suportada por esses dois capacitores em série será de 529,4 V.

Uma maneira mais prática de se descobrir o valor da tensão máxima suportada por dois capacitores em série é simplesmente pegar o valor da menor tensão máxima suportada pelos capacitores e multiplicá-lo por dois. Neste mesmo exemplo, este cálculo prático nos levaria a um limite de tensão de 500 V (250 V · 2), próximo o suficiente do valor calculado e sem a necessidade de se perder muito tempo efetuando cálculos. É claro que neste método simplificado você não terá a mesma precisão.

Capacitores Cerâmicos

Os capacitores cerâmicos são pequenos discos normalmente marrons, cinzas, verdes ou azuis. Eles não possuem polaridade; dessa forma o símbolo de capacitor cerâmico é formado por duas linhas paralelas. Na Figura 24.11 você confere o aspecto físico de capacitores cerâmicos.

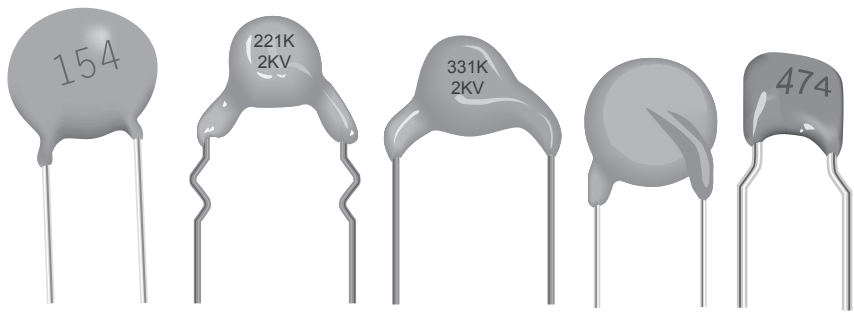


Figura 24.11: Capacitores cerâmicos.

Em geral os capacitores cerâmicos possuem baixa capacitância, tipicamente na ordem de pF ou, em alguns casos, na ordem de poucos nF. Dessa forma, a escolha do tipo de capacitor a ser

usado em um determinado circuito (cerâmico, poliéster, eletrolítico etc.) normalmente é feita de acordo com a capacitância necessária. Por exemplo, se precisamos de um capacitor de 10 pF em um circuito, a escolha obrigatória será de um capacitor cerâmico, já que não existem capacitores de outros tipos com esse valor.

O grande problema dos capacitores cerâmicos é a leitura do valor que há estampado sobre ele. Se o capacitor seguir o padrão europeu de identificação, você não terá qualquer dificuldade, pois o valor do capacitor está escrito diretamente sobre ele. Um capacitor cerâmico marcado com "10p" é de 10 pF, por exemplo. Na Tabela 24.1 nós colocamos os valores comerciais de capacitores usando esse tipo de marcação. Repare que, assim como ocorre com resistores, os capacitores são vendidos de acordo com determinados valores comerciais. Assim, pode ser que não encontre um capacitor com um determinado valor que você calculou para um circuito que você esteja projetando, por exemplo, tendo de usar o capacitor com valor comercial mais próximo.

Tabela 24.1: Valores comerciais de capacitores cerâmicos que usam a codificação europeia.

Valor Estampado	Capacitância
p68	0,68 pF
p82	0,82 pF
1p0	1 pF
1p2	1,2 pF
1p5	1,5 pF
1p8	1,8 pF
2p2	2,2 pF
2p7	2,7 pF
3p3	3,3 pF
3p9	3,9 pF
4p7	4,7 pF
5p6	5,6 pF
6p8	6,8 pF
8p2	8,2 pF
10p	10 pF
12p	12 pF
15p	15 pF
18p	18 pF
22p	22 pF

continua

Valor Estampado	Capacitância
27p	27 pF
33p	33 pF
39p	39 pF
47p	47 pF
56p	56 pF
68p	68 pF
82p	82 pF
n10	100 pF
n12	120 pF
n15	150 pF
n18	180 pF
n22	220 pF
n27	270 pF

O problema de leitura ocorre com capacitores cerâmicos que seguem o padrão norte-americano de marcação, que utilizam um padrão complicado para quem não está acostumado. Na Figura 24.12 nós mostramos essa marcação.

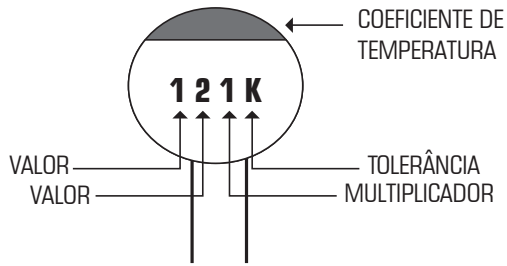


Figura 24.12: Marcação norte-americana de capacitores cerâmicos.

Essa marcação segue um padrão similar ao dos resistores. Os dois primeiros números indicam o valor e o terceiro, a multiplicação. A multiplicação é dada por 10^n, onde "n" é o valor estampado. No caso de não existir o terceiro número, a multiplicação é x1. Lembramos que os valores de capacitores cerâmicos são dados em pF. No caso do capacitor da Figura 24.12, ele é de $12 \cdot 10^1$, ou seja, de 120 pF. Um capacitor cerâmico com a marcação 222 é de $22 \cdot 10^2 = 2200$ pF = 2,2 nF. Já um capacitor cerâmico com a marcação 103 é de $10 \cdot 10^3 = 10000$ pF = 10 nF. E por

aí vai. No caso de existir uma letra "R" no segundo valor, essa letra indica um ponto decimal. Esse tipo de capacitor não possui indicador de multiplicador (a multiplicação é x1). Assim, um capacitor marcado com 4R7 é um capacitor de 4,7 pF.

Já a tolerância é dada pela Tabela 24.2. A tolerância do capacitor da Figura 24.13 é de 10%, como você poderá conferir. Como vimos anteriormente, quando falávamos sobre resistores, a tolerância é o quanto o valor do capacitor pode variar para mais ou para menos a partir do valor estampado.

Tabela 24.2: Código de tolerância de capacitores cerâmicos que usam a codificação norte-americana.

Letra	Capacitores até 10 pF	Capacitores acima de 10 pF
B	± 0,1 pF	–
C	± 0,25 pF	–
D	± 0,5 pF	–
E	–	± 25%
F	± 1 pF	± 1%
G	–	± 2%
H	–	± 2,5 %
J	–	± 5 %
K	–	± 10 %
M	–	± 20 %
P	–	- 0% e + 100%
S	–	- 20% e + 50%
W	–	- 0% e + 200%
X	–	- 20% e + 40%
Z	–	- 20% e + 80%

Os capacitores cerâmicos podem ter o seu topo pintado de uma outra cor. Essa cor indica o seu coeficiente de temperatura. Em alguns capacitores, esse coeficiente, em vez de ser uma cor pintada no topo do capacitor, está escrito, de forma codificada, abaixo da linha que indica a capacitância do capacitor. O coeficiente de temperatura indica o quanto a capacitância do capacitor varia de acordo com a temperatura. Esse assunto é um pouco complexo e foge do escopo principal do nosso livro, motivo pelo qual não explicaremos esse assunto.

Capacitores de Poliéster

Os capacitores de poliéster normalmente possuem valores na ordem de nF. Como são componentes não polarizados, seu símbolo é formado por duas barras paralelas. Se o circuito que você está montando ou projetando exige um capacitor na ordem de nF (ex.: 220 nF), possivelmente sua escolha cairá em um capacitor de poliéster. Fisicamente falando, são maiores do que os capacitores cerâmicos, já que normalmente possuem capacitâncias maiores. Ver Figura 24.13.

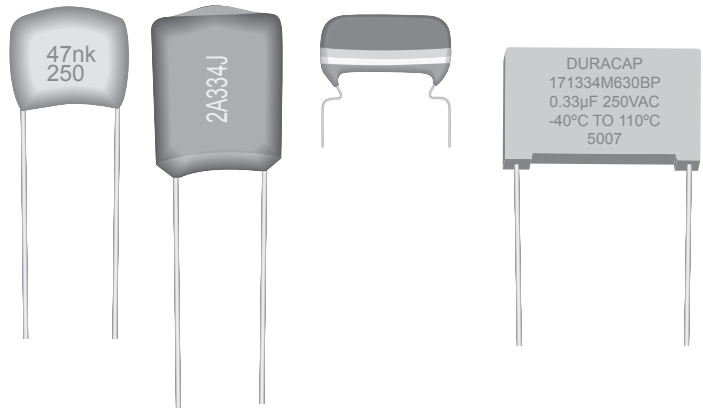


Figura 24.13: Capacitores de poliéster.

Vários capacitores de poliéster já estão vindo com sua capacitância e tensão máxima estampadas diretamente sobre o capacitor, como, por exemplo, "220 nF x 400 V". Em alguns capacitores, a marcação poderá vir com um ponto decimal. O ponto decimal indica que o valor está sendo dado em μF e não em nF. Por exemplo, um capacitor de poliéster marcado com .22 é um capacitor de 0,22 μF, ou seja, 220 nF.

Capacitores de poliéster também podem usar a mesma codificação norte-americana usada por capacitores cerâmicos. Por exemplo, um capacitor marcado "103" é de $10 \cdot 10^3 = 10.000$ pF = 10 nF.

Quando a tensão máxima suportada não é dada, assume-se 250 V.

Os capacitores de poliéster podem vir também com um código de cores similar ao usado por resistores, só que possuindo cinco faixas de cor, em vez de apenas quatro (a quinta faixa indica a tensão máxima suportada pelo capacitor). Esse código nós vemos na Figura 24.14.

Os valores são dados em pF e o código de cores para as três primeiras faixas é idêntico ao usado por resistores (ver Tabela 23.1). Assim, um capacitor de poliéster em que as três primeiras faixas sejam marrom, preto, amarelo, é um capacitor de 100 nF ($10 \cdot 10.000$ pF) ou 0,1 μF.

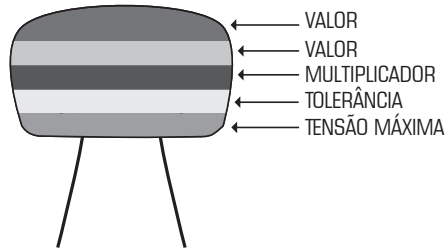


Figura 24.14: Código de cores de capacitores de poliéster.

A faixa de tolerância pode assumir os valores apresentados na Tabela 24.3. Como explicamos anteriormente, a tolerância é o quanto o valor do capacitor pode variar para mais ou para menos a partir do valor estampado.

Tabela 24.3: Tolerância de capacitores de Poliéster.

Cor	Tolerância
Preto	± 20%
Branco	± 10%
Verde	± 5%

Já o código de cores da tensão máxima suportada por capacitores de poliéster é apresentado na Tabela 24.4.

Tabela 24.4: Tensão máxima suportada por capacitores de Poliéster.

Cor	Tensão Máxima
Marrom	100 V
Vermelho	250 V
Amarelo	400 V

Capacitores Eletrolíticos

Os capacitores eletrolíticos conseguem atingir capacitâncias muito maiores do que os capacitores cerâmicos e de poliéster, na ordem de μF. Em contrapartida, eles precisam ser fisicamente muito maiores do que os demais tipos de capacitor apresentados, e normalmente possuem uma tensão máxima menor. Quanto maior o valor da capacitância, maior é o capacitor fisicamente, da mesma forma que ocorre quanto maior for o valor da tensão máxima do capacitor. Um capa-

citor eletrolítico de 100 μF · 100 V é fisicamente muito maior do que um capacitor eletrolítico de 100 μF · 16 V. Na Figura 24.15 vemos os aspectos mais comuns de capacitores eletrolíticos. Como você pode observar, este tipo de capacitor é cilíndrico.

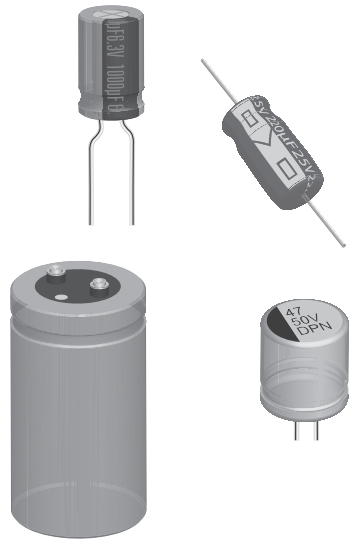


Figura 24.15: Capacitores eletrolíticos.

Capacitores eletrolíticos normalmente têm seus dois terminais localizados no mesmo lado do capacitor. Neste caso o capacitor é chamado radial. Capacitores eletrolíticos também podem ter terminais saindo de lados opostos. Neste caso o capacitor é chamado axial.

A maneira com que o material eletrolítico existente dentro do capacitor funciona faz com que esse capacitor seja do tipo polarizado, isto é, um terminal é positivo e o outro, negativo. Por isso o símbolo de capacitor eletrolítico possui uma indicação de polaridade. Se você inverter a polaridade do capacitor eletrolítico, ele não funcionará e poderá até mesmo explodir.

O valor do capacitor, a sua tensão máxima, e a indicação de polaridade são estampados diretamente sobre o capacitor e você não terá a menor dificuldade na identificação deste tipo de capacitor. Capacitores muito antigos em vez de usarem as letras "μF" para indicarem a capacitância do componente usam "MFD", que significa a mesma coisa (microfarad). Isso ocorria porque antigamente máquinas de escrever não conseguiam imprimir letras gregas.

Existem capacitores eletrolíticos que não são polarizados, também chamados bipolares. Esse tipo de capacitor é normalmente utilizado em aplicações de áudio (construção de filtros, como vimos no tópico *Aplicações*). Nesse caso, o capacitor possui estampada a frase "Não Polarizado" (quando fabricado no Brasil) ou a marcação "NP" (Não Polarizado) e você não encontrará a usual marcação indicativa de qual dos dois terminais é o negativo. Como o sinal elétrico de áudio varia tanto positivamente quanto negativamente, não poderíamos usar capacitores com polaridade para fazer o seu filtro. Normalmente capacitores de poliéster são usados, mas quando são necessários capacitores de capacitâncias maiores – como 10 μF e 100 μF, por exemplo – não existem capacitores de poliéster de valores tão altos, fazendo com que capacitores eletrolíticos não polarizados sejam utilizados.

É possível converter um capacitor eletrolítico polarizado em um não polarizado ligando dois capacitores em série conectando terminais de mesma polaridade ao centro, como mostra a Figura 24.16. A polaridade que vai ao centro não importa, o que importa é que elas sejam do mesmo tipo (negativa ou positiva). Por exemplo, se você precisar de um capacitor de 100 μF não polarizado, poderá colocar dois de 200 μF em série.

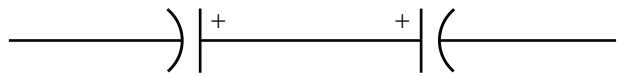


Figura 24.16: Fazendo um capacitor não polarizado a partir de dois capacitores polarizados.

Na ligação em série e em paralelo de capacitores eletrolíticos, a polaridade deverá ser levada em consideração, conforme já explicamos no tópico *Ligação*.

Capacitores Sólidos

Capacitores sólidos, mais precisamente chamados de polímero, são capacitores que não possuem um líquido eletrolítico em seu interior e, com isso, menores são as chances de vazamento, problema que pode ocorrer com capacitores eletrolíticos.

Tudo mais que falamos sobre capacitores eletrolíticos é válido para capacitores sólidos.

Capacitores de Tântalo

Os capacitores de tântalo são idênticos em funcionamento aos capacitores eletrolíticos e, para todos os efeitos, podem ser considerados capacitores eletrolíticos. A diferença entre eles é que o capacitor de tântalo utiliza em seu dielétrico um material (pentóxido de tânta-

lo) que possui uma capacidade maior de armazenamento de cargas elétricas. Em português isso significa que os capacitores de tântalo são bem menores do que capacitores eletrolíticos de mesma capacitância. Uma das vantagens dos capacitores de tântalo em relação aos capacitores eletrolíticos é, portanto, o tamanho físico – ainda mais depois que os fabricantes de equipamentos eletrônicos decidiram fazer aparelhos cada vez menores. No entanto, dificilmente você encontrará capacitores de tântalo de valores altos de capacitância ou de tensões elevadas.

Outras vantagens de capacitores de tântalo em relação aos capacitores eletrolíticos incluem uma melhor operação em altas frequências e uma maior vida útil, especialmente porque resistem melhor aos efeitos da temperatura no interior do aparelho onde são instalados.

Na Figura 24.17 vemos o aspecto físico de capacitores de tântalo.

Figura 24.17: Capacitores de tântalo.

Alguns iniciantes podem achar que capacitores de tântalo podem ser fisicamente muito parecidos com alguns tipos de capacitores de poliéster. No entanto, é fácil identificar um capacitor de tântalo: ele é arredondado (capacitores de poliéster e cerâmicos são "achatados") e sempre haverá uma indicação de polaridade (que não existe em capacitores de poliéster e cerâmicos).

Assim como os capacitores eletrolíticos, os capacitores de tântalo possuem a sua capacitância, tensão máxima e indicação de polaridade estampada no próprio corpo do capacitor. Capacitores de tântalo antigos, no entanto, utilizavam um código de cores similar ao usado por resistores e capacitores de poliéster. Na Figura 24.18 vemos esse código.

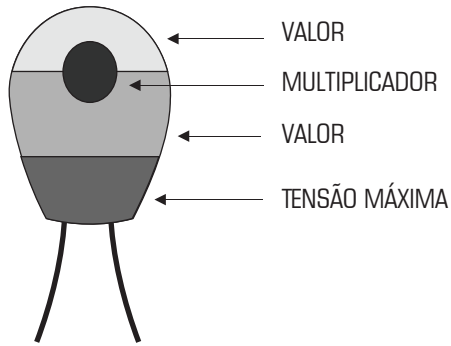


Figura 24.18: Código de cores de capacitores de tântalo.

O código de cores para o ponto multiplicador é mostrado na Tabela 24.5.

Tabela 24.5: Código de cores usado nos capacitores de tântalo.

Cor	Multiplicador
Cinza	x 0,01
Branco	x 0,1
Preto	x 1
Marrom	x 10
Vermelho	x 100

Já o código de cores para a tensão máxima é mostrado na Tabela 24.6.

Tabela 24.6: Código máximo suportado por capacitores de tântalo.

Cor	Tensão Máxima
Branco	3 V
Amarelo	6,3 V
Preto	10 V
Verde	16 V
Azul	20 V
Cinza	25 V
Rosa	35 V

Assim, um capacitor de tântalo com as cores marrom, preto e verde, e ponto multiplicador preto, é um capacitor de 10 μF · 16 V.

Capacitores SMD

Dispositivos de montagem em superfície (SMD, Surface Mount Device) são componentes de tamanho físico bastante reduzido, que são soldados a placas de circuito impresso através de ferramentas robóticas. Este tipo de componente, portanto, não é voltado ao hobista.

Capacitores SMD são dispositivos retangulares, podendo ser cerâmicos (quando marrom ou cinza) ou de tântalo (quando amarelo ou preto). Na Figura 24.19 vemos o aspecto físico de capacitores SMD.

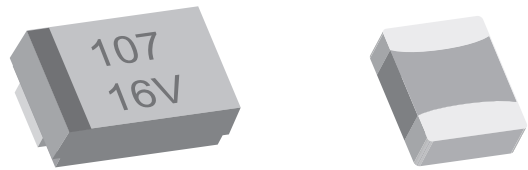


Figura 24.19: Capacitores SMD.

Os capacitores cerâmicos não têm polaridade e são mais usados quando é necessário um capacitor de baixa capacitância, na ordem de pF ou nF, ou seja, eles são equivalentes diretos dos capacitores cerâmicos e de poliéster.

Já os capacitores de tântalo têm polaridade, indicada através de uma listra próxima a um de seus terminais, que indica o terminal negativo, e são usados quando é necessário um componente de capacitância mais elevada, na ordem de μF.

O valor da capacitância é estampado sobre o corpo do capacitor, e normalmente representa o valor em μF. Por exemplo, um capacitor "47 16 V" é um capacitor de 47 μF x 16 V.

Alternativamente, é possível representar a capacitância através de três números, onde o terceiro número indica a potência de dez pela qual os dois primeiros números precisam ser multiplicados, seguido do valor da tensão máxima suportada. O valor é dado em pF. Por exemplo, o capacitor da esquerda da Figura 24.19 é de $10 \cdot 10^7 = 100.000.000$ pF = 100 μF. Neste caso, o capacitor possuía uma indicação de tensão abaixo de seu valor codificado. Em outros casos, o valor da tensão será dado através de uma letra colocada antes do valor codificado do capacitor. Resumimos este esquema de codificação na Figura 24.20.

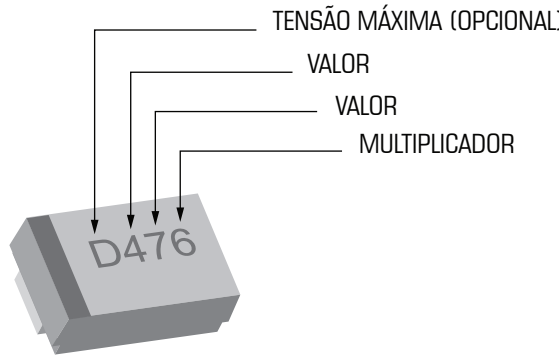


Figura 24.20: Código usado por capacitores SMD.

Tabela 24.7: Código usado por capacitores SMD.

Letra	Tensão Máxima
e	2,5 V
G	4 V
J	6,3 V
A	10 V
C	16 V
D	20 V
E	25 V
V	35 V
H	50 V

Por exemplo, um capacitor rotulado como "J106" indica um capacitor de $10 \cdot 10^6 = 10.000.000$ pF = 10 μF x 6,3 V.

Capacitores Variáveis

Capacitores variáveis, como o nome diz, são capacitores cuja capacitância varia. A capacitância varia através do afastamento e da aproximação das placas que compõem o capacitor, o que é feito através de um cursor central. Vimos no tópico *Aplicações* uma aplicação típica de capacitores variáveis: no circuito sintonizador de rádios. Em rádios analógicos, quando mudamos sua sintonia, estamos na verdade girando o cursor central de um capacitor variável. Capacitores variáveis em miniatura são também conhecidos como *trimmer*.

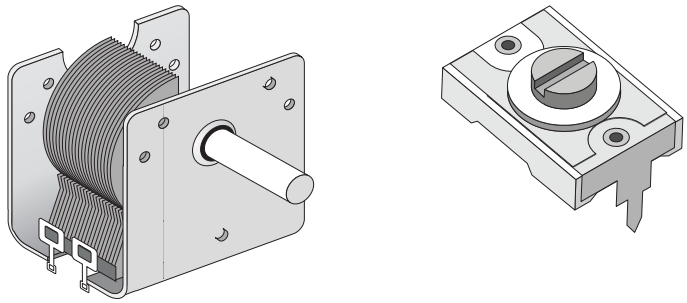


Figura 24.21: Capacitores variáveis.

Testando Capacitores

Capacitores podem ser testados através de um instrumento chamado capacímetro. Alguns multímetros mais sofisticados (e mais caros) possuem esta ferramenta incorporada.

É possível testar capacitores usando um ohmímetro (multímetro na escala de resistência). Como capacitores são formados por duas placas paralelas que não se encostam, conectando um capacitor ao ohmímetro o instrumento de medida deverá ler infinito. Caso ele leia uma resistência, isso significa que as placas dentro do capacitor estão encostando e, portanto, o capacitor está danificado. É importante notar que em alguns casos você verá a resistência do capacitor ir incrementando aos poucos, até marcar infinito. Isso é normal, pois mostra o capacitor se carregando.

Note que este é um teste rudimentar e só detectará capacitores com um problema extremo. Você não conseguirá, sem o auxílio de um capacímetro, verificar a capacitância do capacitor.

Exercícios

1. Como um capacitor se comporta em um circuito de corrente contínua?
2. Como um capacitor se comporta em um circuito de corrente alternada?
3. Um capacitor de 22 pF é provavelmente de que tipo?
4. Um capacitor de 470 nF é provavelmente de que tipo?
5. Um capacitor de 10 μF é provavelmente de que tipo?
6. Qual é o valor equivalente de um capacitor de 220 nF x 400 V colocado em paralelo com um capacitor de 470 nF x 250 V?
7. Qual é o valor equivalente de dois capacitores de 1200 μF x 200 V colocados em série?
8. Qual é o valor equivalente de um capacitor de 560 nF x 250 V colocado em série com um capacitor de 330 nF x 400 V?
9. Qual é a capacitância de um capacitor cerâmico rotulado “222”?
10. Qual é a capacitância de um capacitor de poliéster com as cores marrom, cinza, amarelo, branco, vermelho?
11. Qual é o valor do capacitor da Figura 24.20?

Capítulo 25
Bobinas

Introdução

Muitos estudantes e hobistas têm dificuldade em entender o funcionamento de indutores (bobinas). Na realidade, é fácil entender o funcionamento desses componentes, pois eles funcionam de forma similar aos capacitores.

Em circuitos de corrente contínua, capacitores funcionam como um circuito aberto quando estão carregados. Os indutores (bobinas) possuem esse funcionamento quando estão conectados a um circuito de corrente alternada.

Já em circuitos de corrente alternada, capacitores deixam passar corrente. Os indutores possuem esse funcionamento quando estão conectados a um circuito de corrente contínua.

Em circuitos de corrente alternada, bobinas criam uma resistência à passagem da corrente elétrica, chamada *reatância indutiva* (ver Capítulo 8). Essa reatância varia de acordo com a frequência da forma de onda e da indutância do componente. Bobinas são tradicionalmente usadas como filtros, deixando passar ou bloqueando determinadas frequências, assim como ocorre com capacitores.

Além disso, em circuitos de corrente alternada, o campo eletromagnético gerado por uma bobina induzirá (isto é, gerará) tensão elétrica em um fio colocado perpendicularmente a esse campo eletromagnético. É assim que os transformadores funcionam (estudaremos transformadores no próximo capítulo). O mesmo não ocorre em circuitos de corrente contínua. Neste tipo de circuito, o campo magnético constante gerado pela bobina funciona como um eletroímã.

Transaction: HP17915499929393 e-mail: leticiamarchitotal@gmail.com CPF

A indutância de uma bobina é medida em uma unidade chamada henry (H).

Fisicamente falando, uma bobina é simplesmente um fio enrolado, podendo ter ou não um material compondo o seu núcleo.

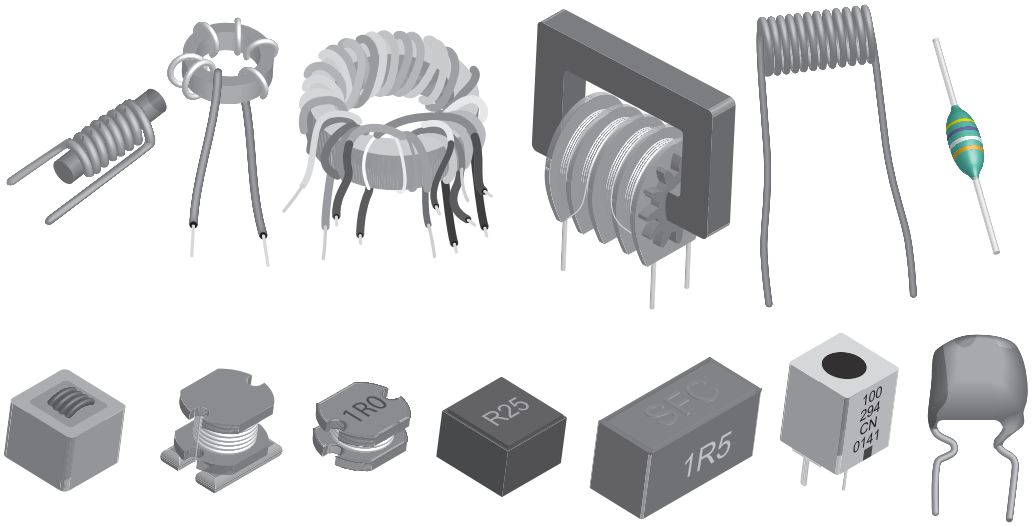


Figura 25.1: Bobinas.

Bobinas desenhadas para bloquearem altas frequências (ou seja, filtros do tipo passa-baixa) são também conhecidas, em inglês, como *chokes* (pronúncia: "tchôuque").

Simbologia

O símbolo da bobina é um fio enrolado. Eventualmente poderá haver barras paralelas ao seu lado, indicando o tipo de material usado em seu núcleo. Os materiais mais comuns são o ferro (duas linhas paralelas) e o ferrite (duas linhas pontilhadas). A presença de uma seta indica uma bobina variável, onde o valor da sua indutância é alterada ao girarmos um cursor central (normalmente movendo a posição do material que compõe o núcleo da bobina).

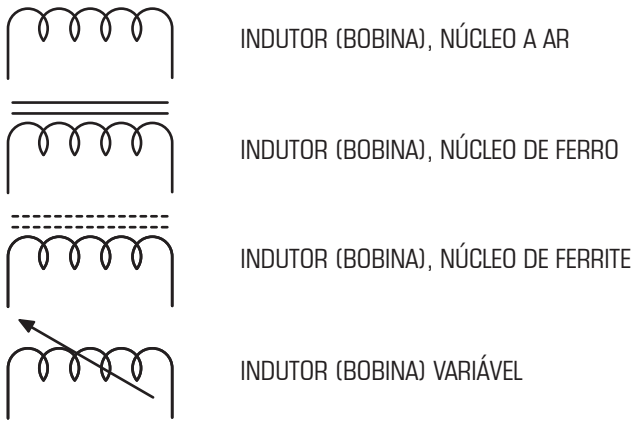


Figura 25.2: Simbologia usada por bobinas.

Funcionamento

A espessura do fio e o número de espiras são os principais fatores que influenciam no valor da indutância de uma bobina.

Indutores apresentam uma curva característica chamada *curva de magnetização* ou *curva BH*. Essa curva mostra a relação entre a indução magnética (representada pela letra B e medida em uma unidade chamada tesla, símbolo T) e a intensidade do campo magnético (representada pela letra H e medida em ampères por metro, símbolo A/m) da bobina. Alternando-se o material usado no núcleo da bobina, alteramos significativamente o formato dessa curva, como você pode ver na Figura 25.3.

Essa curva mostra que a indução magnética (B) aumenta de acordo com um aumento na intensidade do campo magnético (H). Porém, há um momento em que, mesmo aumentando-se a intensidade do campo magnético (H), a indução magnética para de aumentar. Esse momento chama-se *saturação magnética*.

Como você pode ver observando a Figura 25.3, a diferença de material usado no núcleo da bobina influencia diretamente na indução magnética e no ponto de saturação magnética da bobina.

Quando uma bobina com um núcleo diferente do ar é "desligada", o campo magnético ao redor dela e a indução magnética não são imediatamente cessados. Isso ocorre porque o material usa-

do no núcleo é eletromagnético e retém parte de seu magnetismo mesmo quando a corrente elétrica que passa pela bobina é cortada. Quando a corrente circulando é cessada, esse magnetismo induzirá na bobina uma corrente elétrica, que seguirá no sentido oposto ao da corrente originalmente aplicada. Isso significa que bobinas armazenam energia, que tenta manter-se quando a corrente para de circular. Desta forma, em circuitos de corrente alternada, bobinas funcionam tal como capacitores em circuitos de corrente contínua, armazenando energia.

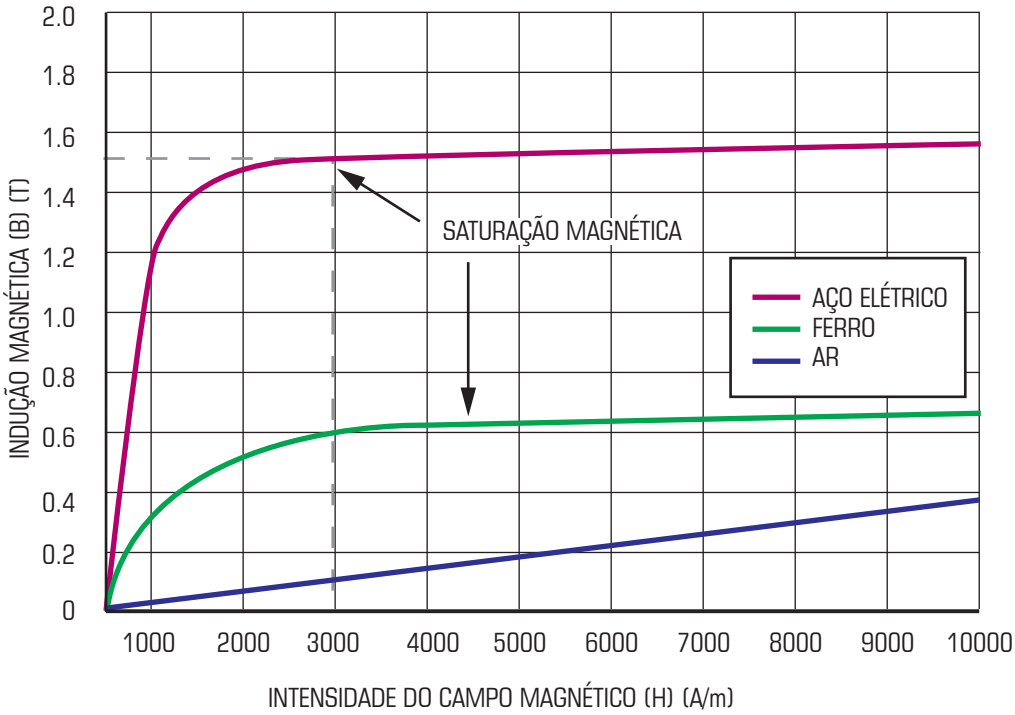


Figura 25.3: Curva de magnetização para vários materiais.

Podemos agora desenhar uma nova curva de magnetização combinando o período em que a bobina permanece "ligada" (corrente passando por ela) e com ela "desligada" (corrente original cortada). Essa curva é chamada *curva de histerese*. Mostramos um exemplo de curva deste tipo na Figura 25.4.

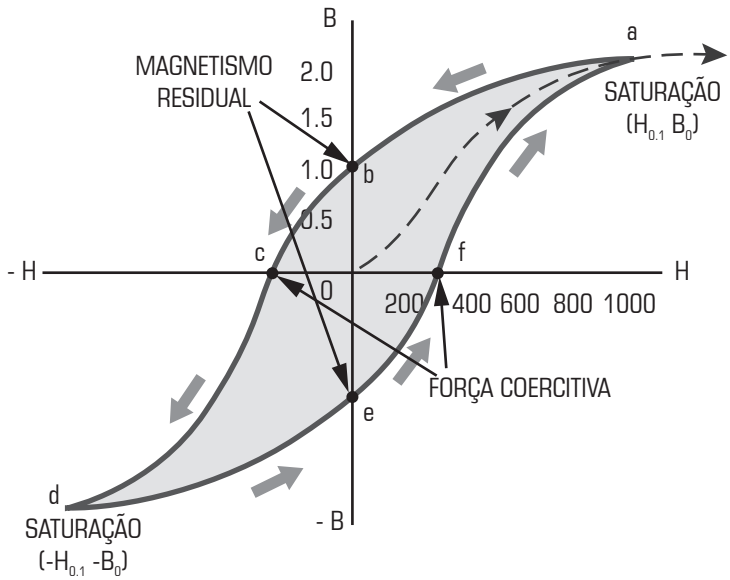


Figura 25.4: Exemplo de curva de histerese.

Quando o circuito onde a bobina está conectada é ligado pela primeira vez, B e H estarão no ponto "0" do gráfico. B e H aumentarão em direção ao ponto "a" traçando a curva desenhada em pontilhado, atingindo a saturação magnética. A partir desse ponto, quando a corrente que passa pela bobina for cessada, a bobina começará a se descarregar, com B e H seguindo em direção ao ponto "b". A bobina ficará completamente descarregada ao chegar no ponto "c". Em seguida, por estar ligada em um circuito de corrente alternada (lembre-se, bobinas só funcionam em circuitos de corrente alternada), a corrente começará a fluir no sentido oposto, fazendo com que B e H caminhem na direção do ponto "d". Quando a corrente for cortada, B e H começarão a ir em direção ao ponto "e", repetindo o processo, só que agora no sentido oposto.

A área da curva de histerese indica a *perda* da bobina, que é a dissipação de energia em forma de calor. Ou seja, quanto maior a perda de uma bobina, menor será a energia que ela armazenará. Em outras palavras, procuramos sempre uma bobina com a menor área possível em sua curva de histerese. O ferrite possui menor perda que o ferro, e o aço elétrico (também chamado aço-silício) possui menor perda do que o ferrite. Materiais com menor perda são mais caros.

Dessa forma, o material usado no núcleo da bobina influencia diretamente na capacidade da bobina em armazenar energia por dois motivos: ponto de saturação (quanto maior, melhor) e perda (quanto menor, melhor).

O formato da bobina e de seu núcleo (circular, retangular, reto etc.) depende da aplicação que será dada ao componente, do espaço físico disponível dentro do aparelho onde a bobina será instalada e dos limites de interferência eletromagnética desejados, pois, como vimos, quando em funcionamento uma bobina gera um campo eletromagnético ao seu redor.

Aplicações

Há duas aplicações principais de bobinas: filtro e armazenamento de energia. O uso mais comum de bobinas como componente para o armazenamento de energia é em fontes de alimentação chaveadas, e estudaremos esta aplicação em detalhes no Capítulo 31.

No Capítulo 8 nós estudamos em detalhes o efeito de um capacitor e de uma bobina ligados em série ou em paralelo quando o circuito atinge a frequência de ressonância. Podemos facilmente construir um filtro passa-faixa, isto é, que deixa passar somente uma determinada frequência, colocando um capacitor e uma bobina e calculando os seus valores de acordo com a frequência de ressonância pretendida, isto é, a frequência de atuação do filtro.

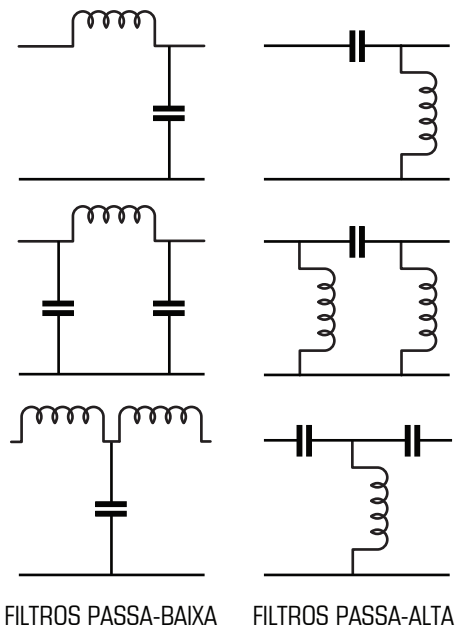


Figura 25.5: Filtros usando bobinas e capacitores.

No tópico *Aplicações* do Capítulo 24, nós vimos o conceito dos filtros passa-baixa (que deixa somente passar frequências abaixo de uma determinada frequência) e passa-alta (que deixa somente passar frequências acima de uma determinada frequência). Na ocasião vimos como esses filtros podem ser construídos usando capacitores. Na Figura 25.5 vemos vários circuitos de filtros passa-baixa e passa-alta usando bobinas e capacitores simultaneamente.

Lendo Valores

Em vários aparelhos eletrônicos, bobinas (especialmente as de maior tamanho físico) são feitas sob medida, não trazendo estampado o seu valor. Nesse caso, a única forma de descobrir o valor da bobina é através do diagrama esquemático do circuito ou através do uso de um indutímetro.

No caso de o aparelho usar bobinas comerciais, o valor estará impresso em seu corpo. Se o valor impresso não apresentar o símbolo H (normalmente mH ou μH), então ele está impresso de forma codificada. Vamos estudar os padrões mais comuns.

Bobinas SMD

Dispositivos de montagem em superfície (SMD, Surface Mount Device) são componentes de tamanho físico bastante reduzido, que são soldados a placas de circuito impresso através de ferramentas robóticas. Este tipo de componente, portanto, não é voltado ao hobista. Todas as bobinas presentes na parte inferior da Figura 25.1 são deste tipo.

Bobinas SMD podem apresentar dois formatos de codificação. O mais comum é o uso de três números, onde o terceiro número indica a potência de dez pela qual os outros dois números devem ser multiplicados. O resultado é dado em μH. Assim, uma bobina marcada "101" indica $10 \cdot 10^1 = 100\ \mu$H.

Se houver a presença da letra "R", esta indica ponto decimal, e a leitura é feita diretamente, em μH. Assim, uma bobina marcada "1R0" tem uma indutância de 1μH e uma bobina marcada "R25" tem indutância de 0,25 μH, ou seja, 250 nH.

Eventualmente poderá haver uma letra ao final da marcação indicando a tolerância do componente, conforme a Tabela 25.1. Tolerância é o quanto o valor do componente pode variar para cima ou para baixo em relação ao valor estampado.

Tabela 25.1: Tolerância de bobinas SMD.

Marcação	Tolerância
J	±5 %
K	±10%

continua

Marcação	Tolerância
M	±20%
N	±30%
Y	±25%

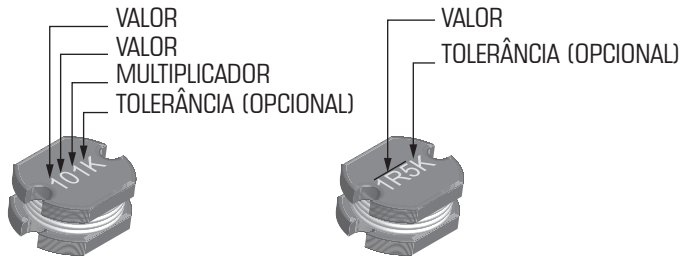


Figura 25.6: Código usado por bobinas SMD.

Código de Cores

Bobinas podem usar o mesmo código de cores usado por resistores (ver Tabela 23.1), com o valor sendo dado em μH. Na Figura 25.7 vemos o formato usado por bobinas revestidas em epóxi e, na Figura 25.8, o formato usado por bobinas axiais. Assim, uma bobina revestida em epóxi onde a cor 1 é o amarelo, a cor 2 é o lilás e a cor 3 é o marrom, indica uma bobina de 470 μH (cor 1 = 4, cor 2 = 7, cor 3 = x10). Já uma bobina axial onde a primeira listra é vermelha, a segunda é lilás, a terceira é marrom e a quarta é dourada, indica um componente de 270 μH ±5%.

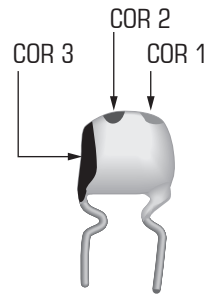


Figura 25.7: Código usado por bobinas revestidas em epóxi.

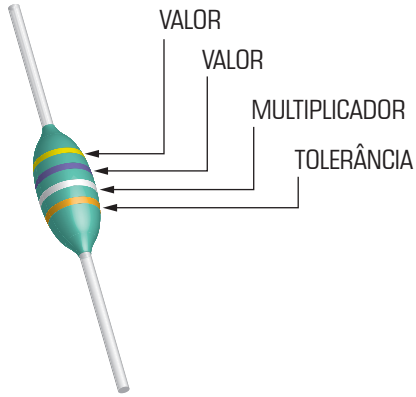


Figura 25.8: Código usado por bobinas axiais.

Como Testar

O teste de bobinas deve ser feito através de um instrumento chamado indutímetro, com o componente removido do circuito. Alguns multímetros mais sofisticados (e mais caros) trazem este instrumento incorporado.

Você pode fazer um teste rudimentar testando a bobina usando um ohmímetro (multímetro na escala de resistência), como se fosse um resistor (ou seja, com o componente removido do circuito e com o circuito obviamente desligado). Se o ohmímetro marcar resistência infinita, isto indica que o fio do componente está partido e, portanto, o componente está danificado. Bobinas devem sempre marcar baixa resistência.

Obviamente este teste funciona apenas para indicar se a bobina está aberta, e sem um indutímetro você não terá como verificar se a bobina está apresentando a indutância correta.

◆◆◆

Exercícios

1. Como uma bobina se comporta em um circuito de corrente contínua?
2. Como uma bobina se comporta em um circuito de corrente alternada?
3. No que o material usado no núcleo da bobina influencia?
4. Qual é o valor de uma bobina com a marcação “1R2M”?
5. Qual é o valor de uma bobina axial com as cores vermelho, vermelho, marrom, prateado?

Capítulo 26
Transformadores

Introdução

Transformadores são duas bobinas enroladas juntas e sem contato elétrico entre elas. Como estudamos anteriormente, quando uma tensão alternada é aplicada a uma bobina, ela consegue induzir (gerar) corrente elétrica em um fio colocado perpendicularmente dentro de seu campo eletromagnético. Assim, um transformador funciona transferindo energia elétrica de uma bobina (chamada primário) para outra (chamada secundário). A tensão na segunda bobina (secundário) poderá ser igual, maior ou menor do que a tensão aplicada na primeira bobina (primário), dependendo de como o transformador é construído.

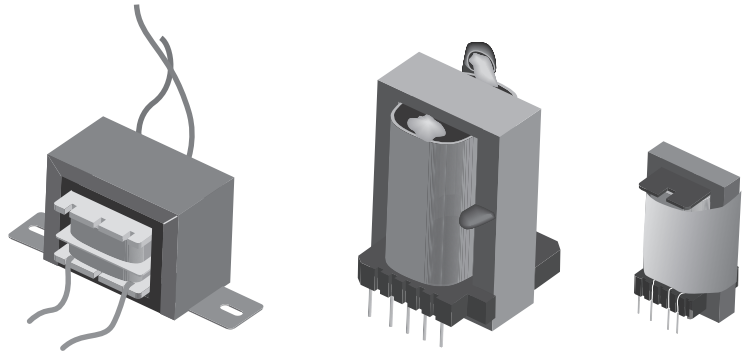


Figura 26.1: Transformadores.

Transformadores comerciais possuem essas duas bobinas enroladas juntas ao redor de um núcleo metálico, possuindo pelo menos quatro fios, dois para a bobina do primário e dois para a bobina do secundário. Os transformadores poderão eventualmente ter mais fios, conforme veremos mais adiante.

Alguns técnicos chamam transformadores de "trafo".

Simbologia

A simbologia para transformadores pode ser vista na Figura 26.2. Ela expressa claramente a existência de duas bobinas sem contato elétrico entre elas. Eventualmente poderá haver barras paralelas ao centro, indicando o tipo de material usado no núcleo. Os materiais mais comuns são o ferro (duas linhas paralelas) e o ferrite (duas linhas pontilhadas).

Opcionalmente a simbologia pode mostrar qual das bobinas (primário ou secundário) possui um maior número de espiras, indicando se o transformador é um abaixador de tensão ou um elevador de tensão (ver tópico *Aplicações* para entender estes conceitos) e, ainda, um ponto ("bolinha") indicando a direção em que as bobinas foram enroladas (ver tópico *Construção*).

Na Figura 26.2 os transformadores possuem apenas dois fios em cada bobina. Em caso do uso de transformadores com mais fios, a simbologia será modificada de forma a incluí-los.

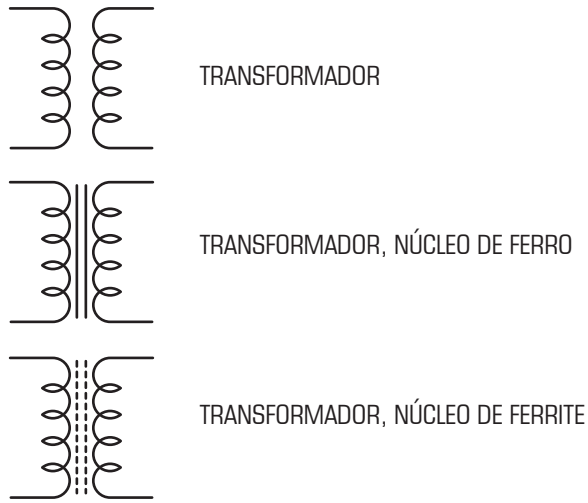


Figura 26.2: Simbologia usada por transformadores.

Bobina Que Se Parece Com um Transformador

É importante notar que existe um tipo de bobina usada em circuitos de filtragem ("choke") que se parece com um transformador e que poderá confundi-lo. Entretanto, analisando atentamente esta bobina, você verá que ela é conectada conforme mostrado na Figura 26.4.

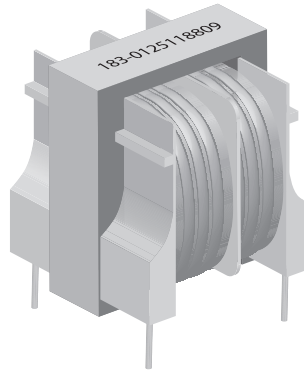


Figura 26.3: Bobina que se parece com um transformador.

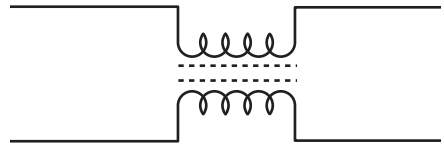


Figura 26.4: Conexão mostra claramente que ela não é um transformador.

Construção

Como já explicado, um transformador é construído enrolando-se duas bobinas em redor de um núcleo metálico (embora seja possível construir transformadores "sem núcleo", ou seja, cujo núcleo é o ar). Vamos agora estudar os pormenores da construção de transformadores.

Relação de Espiras

Como explicamos, o primário é a "entrada" do transformador, enquanto que o secundário é a sua "saída". Ao aplicarmos uma tensão alternada no primário do transformador, teremos uma tensão em seu secundário, que poderá ser maior, menor ou igual à tensão aplicada em seu primário.

Se o transformador vai aumentar, diminuir ou manter o valor da tensão aplicada no primário vai depender da relação entre o número de espiras (voltas ou enrolamentos) usadas na bobina do primário e o número de espiras usadas na bobina do secundário. Esta relação entre tensão e número de espiras é dada pela seguinte equação, onde V_S é a tensão obtida no secundário, V_P é a tensão aplicada no primário, N_S é o número de espiras da bobina do secundário e N_P é o número de espiras da bobina do primário:

$$\text{Relação do número de espiras} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \qquad (26.1)$$

Assim, se quisermos construir um transformador para reduzir uma tensão de 110 V para 12 V, temos uma relação de espiras entre o primário e o secundário de 9,16. Assim, se colocássemos uma bobina com 100 espiras no secundário, o primário deste transformador teria de ser construído com uma bobina contendo aproximadamente 917 espiras ($N_P = N_S \cdot$ relação).

Se quisermos construir um transformador para aumentar uma tensão de 12 V em 110 V, temos uma relação de espiras entre o primário e o secundário de 0,109. Assim, se colocássemos uma bobina com 1000 espiras no secundário, o primário deste transformador teria de ser construído com uma bobina contendo aproximadamente 110 espiras ($N_P = N_S \cdot$ relação). Agora veja que interessante! Poderíamos usar o mesmo transformador calculado acima, apenas invertendo-o, isto é, o seu primário passa a ser o secundário e vice-versa, pois a relação de espiras é a mesma, porém invertida (1 / 9,16 = 0,109). Em outras palavras, se colocássemos 100 espiras no primário, precisaríamos de um secundário com aproximadamente 917 espiras.

Se o número de espiras da bobina do secundário for menor que o número de espiras da bobina do primário, teremos uma tensão na saída do transformador *menor* do que a tensão aplicada no primário. Se o número de espiras da bobina do secundário for maior que o número de espiras da bobina do primário, teremos uma tensão na saída do transformador *maior* do que a tensão aplicada no primário. E se construirmos um transformador onde a quantidade de espiras das duas bobinas seja exatamente a mesma, a tensão na saída do transformador será *igual* à tensão aplicada no primário.

É possível fazer conexões no meio da bobina do primário ou do secundário para termos várias entradas ou saídas no mesmo transformador. Por exemplo, vimos que um transformador de 110 V para 12 V precisa ter uma relação de espiras de 9,16 (por exemplo, 917 espiras no primário e 100 espiras

no secundário). Já um transformador de 220 V para 12 V precisa ter uma relação de espiras de 18,3 (por exemplo, 1.833 espiras no primário e 100 espiras no secundário). Dessa forma, podemos criar facilmente uma derivação exatamente no meio da bobina do primário para fazer com que o mesmo transformador possa ser usado tanto em 110 V (quando usamos o fio do meio) quanto em 220 V (quando usamos os fios das extremidades). Podemos aplicar a mesma ideia para o secundário.

Na Figura 26.5 ilustramos o exemplo de um transformador de 110 V ou 220 V para 12 V ou 24 V. Se quisermos conectar este transformador a uma tomada de 110 V, usamos os fios marcados com "0" e "110 V". Se quisermos conectá-lo a uma tomada de 220 V, usamos os fios marcados com "0" e "220 V". Já no secundário do transformador, se quisermos uma saída de 12 V, usamos um dos fios marcados com "12 V" (não importa qual) e o fio marcado com "0". Se quisermos uma saída de 24 V, usamos os dois fios marcados com "12 V".

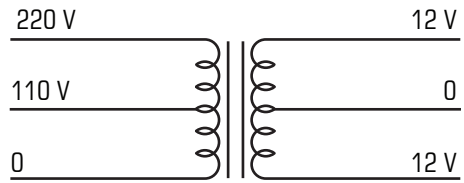


Figura 26.5: Exemplo de transformador com múltiplas conexões.

Neste exemplo que demos, a derivação foi feita exatamente no meio da bobina tanto do primário quanto do secundário, mas este foi somente um exemplo. Se quiséssemos que no secundário tivéssemos uma saída de 12 V e uma saída de 18 V, por exemplo, esta conexão não seria exatamente ao centro da bobina do secundário. Nesta outra situação, supondo um transformador cujo primário queremos conectar a 127 V, teremos uma relação de espiras de 10,58 para a saída de 12 V e 7,06 para a saída de 18 V. Desta forma, se a bobina do primário tiver 1000 espiras, teremos no secundário aproximadamente 94 espiras para a saída de 12 V e mais 48 espiras a partir desta saída para termos a saída de 18 V (para 18 V precisamos aproximadamente 142 espiras; como já temos 94 espiras, sobram 48).

Direção dos Enrolamentos

Se a bobina do secundário for enrolada na mesma direção da bobina do primário, então o secundário estará em fase com o primário, ou seja, a tensão resultante no secundário estará em fase (mesma direção) da tensão do primário. No entanto, se a bobina do secundário for enrolada em direção oposta à bobina do primário, então o secundário estará fora de fase em relação ao

primário. Com isso, a tensão resultante no secundário estará invertida (defasagem de 180º) em relação à tensão aplicada no primário.

Para indicar se as bobinas estão em fase ou fora de fase, usa-se um círculo ("bolinha") perto de cada bobina. As bolinhas colocadas do mesmo lado do transformador indicam que as bobinas estão em fase, enquanto que se for colocada uma bolinha de cada lado do transformador isso indica que as bobinas estão fora de fase. Quando bolinhas não são desenhadas, isso indica que as bobinas estão fora de fase. Resumimos este assunto na Figura 26.6.

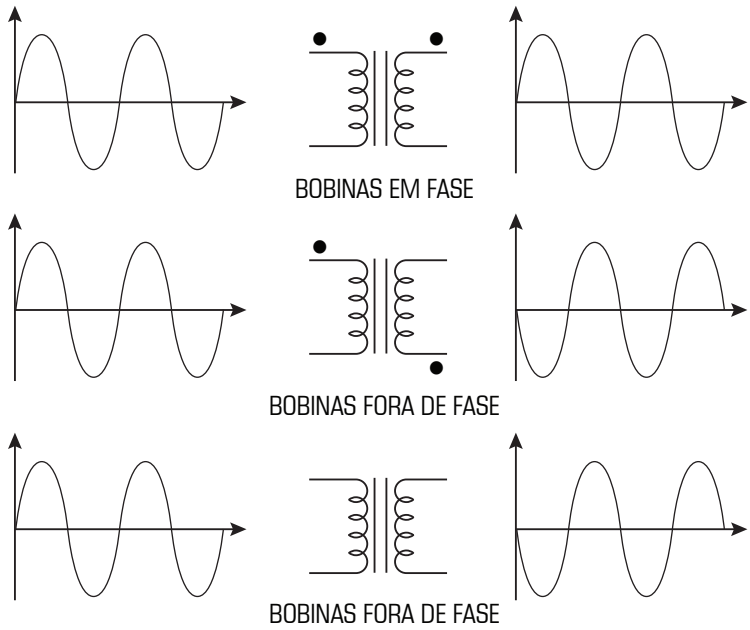


Figura 26.6: Enrolamento das bobinas.

Material do Núcleo

O material a ser usado no núcleo vai ser responsável principalmente pela *eficiência* do transformador. Transformadores ideais teoricamente conseguem entregar em seu secundário toda energia presente no primário, sem qualquer perda. Só que na prática há perda, isto é, parte da

energia é dissipada através de calor em vez de ser entregue ao secundário. Isso faz com que o transformador consuma energia para seu próprio funcionamento (no Capítulo 31 teremos uma discussão mais detalhada a respeito de eficiência energética).

Como vimos no capítulo passado, materiais usados como núcleo de bobinas possuem uma curva de histerese cuja área informa a perda. Dessa forma, dependendo do material que é usado no núcleo da bobina, a perda será maior ou menor. Por exemplo, o aço elétrico (aço-silício) é melhor do que o ferrite, que é melhor do que o ferro, que é melhor do que o ar. Acontece que o custo desses materiais é inversamente proporcional às suas perdas e, dessa forma, o tipo de material acaba sendo escolhido por questões de custo.

Transformadores tradicionalmente utilizam núcleo de ferro, porém nos últimos anos temos visto o crescimento do uso do ferrite, especialmente em transformadores usados em fontes de alimentação de alta eficiência.

Para uma discussão teórica deste assunto, leia o tópico *Funcionamento* do capítulo passado.

Aplicações

Dependendo da relação de espiras entre o primário e o secundário podemos criar basicamente três tipos de transformador:

- **Abaixador de tensão ($N_S < N_P$):** Esse é o tipo de transformador mais comum que encontramos no dia a dia. Nele, a tensão que obtemos no secundário (ou seja, na "saída" do transformador) é menor que a tensão aplicada no primário (ou seja, na "entrada" do transformador). Esse é o transformador típico que usamos quando queremos abaixar a tensão da rede elétrica (de 110 V ou 220 V) para uma tensão que será usada para alimentar um equipamento eletrônico (6 V, 9 V, 12 V, etc.). Note que a tensão na saída do transformador continua sendo alternada. Como a maioria dos equipamentos eletrônicos tem de ser alimentado por tensão contínua, há a necessidade de se transformar a tensão alternada encontrada na saída do transformador em tensão contínua. Explicaremos como isso é feito em detalhes no Capítulo 31.
- **Isolador de tensão ($N_S = N_P$):** A tensão da saída é igual à da entrada. Serve basicamente para isolarmos equipamentos do sistema elétrico da entrada.
- **Elevador de tensão ($N_S > N_P$):** A tensão do secundário é maior que a do primário. Em aparelhos de TV e monitores de vídeo baseadas em tubo de imagem há um famoso transformador elevador de tensão, chamado fly-back, que eleva a tensão de cerca de 400 V para 30.000 V para alimentar o tubo de imagens. Em monitores e televisores LCD também há um transformador deste tipo em um circuito chamado inversor, que é usado para alimentar a lâmpada que fica atrás do painel de cristal líquido.

Os transformadores comerciais são tipicamente vendidos de acordo com as tensões de entrada e saída, além de informar a corrente máxima que o transformador suporta. Por exemplo, "transformador 110 V x 12 V x 250 mA". Esse é um transformador onde aplicamos 110 V_{CA} em sua entrada e obteremos 12 V_{CA} em sua saída, e poderá ser usado para alimentar circuitos que consumam até 250 mA.

O que ocorre se você instalar esse transformador em uma tomada de 220 V? Como a tensão de entrada será o dobro da esperada, a tensão de saída também será o dobro da esperada (passará a ser 24 V).

A maioria dos transformadores comerciais usados em circuitos eletrônicos é vendida com dois fios no primário: 110 V e 220 V (ver Figura 26.5). Instalando uma chave seletora, podemos selecionar qual será a tensão de entrada, 110 V ou 220 V.

Se você instalar esse transformador com a chave na posição 110 V em uma rede de 220 V, vimos que a tensão na saída dobrará, passando a ser 24 V_{CA}. Já se você instalar o transformador com a chave na posição 220 V em uma rede de 110 V, a tensão cairá pela metade, passando a ser 6 V_{CA}.

Se você parar para pensar, o que pode queimar um equipamento eletrônico: aplicar o dobro de sua tensão de funcionamento ou aplicar a metade de sua tensão de funcionamento? Colocar o dobro da tensão pode queimar o equipamento, ao passo que ao se aplicar a metade da tensão o máximo que ocorrerá será o equipamento não funcionar. É por esse motivo que todos os aparelhos eletrônicos vêm de fábrica com a sua chave seletora 110/220 V na posição 220 V (se você instalar o equipamento em uma rede de 110 V sem mudar a chave de posição, o equipamento não queimará). É claro que hoje em dia está cada vez mais comum o uso de seletores automáticos de tensão. Nesse caso, é usado um circuito eletrônico antes do transformador que verifica a tensão de entrada (um voltímetro eletrônico bem simples) e que seleciona, eletronicamente (através de uma chave eletrônica, como, por exemplo, um relé), o fio do transformador que será usado (na realidade equipamentos eletrônicos mais recentes usam um mecanismo diferente, pois eles usam uma fonte de alimentação por chaveamento em alta frequência, que funciona de maneira um pouco diferente desta; explicaremos melhor o funcionamento de fontes de alimentação no Capítulo 31).

Como explicamos anteriormente, o secundário do transformador também poderá ter vários fios. Esses vários fios poderão fornecer várias tensões diferentes. Esse tipo de transformador é muito usado por fontes de alimentação que necessitam alimentar circuitos que possuem uma série de tensões de alimentação diferentes.

No mercado é muito comum a venda de transformadores com três fios na saída. O fio do meio é chamado "center tape" e abreviado "CT". Um transformador com saída de 12 V com "center tape" é chamado 12+12. Este é o caso do transformador da Figura 26.5.

Para obtermos 12 V_{CA} na saída de um transformador com "center tape", devemos usar o fio rotulado "CT" e qualquer um dos outros dois fios do secundário. Se usarmos os dois fios "da ponta", teremos 24 V_{CA} na saída. Você deve estar perguntando por que usar um transformador com "center tape". Se quiséssemos montar uma fonte de 24 V usaríamos diretamente um transformador de 24 V e não um de 12+12 V. Então, qual é a vantagem desse tipo de transformador?

Há duas vantagens básicas. Primeiro, com um transformador com "center tape" podemos construir o circuito retificador usando apenas dois diodos e não quatro, tornando a fonte de alimentação mais barata (veremos isso no Capítulo 31). A segunda vantagem é que podemos facilmente construir uma fonte simétrica. Uma fonte simétrica é uma fonte de alimentação capaz de fornecer duas tensões opostas, por exemplo 12 V e -12 V. Usando o transformador ilustrado na Figura 26.5, podemos facilmente construir essa fonte, usando um dos fios marcados com 12 V para formar a saída de 12 V e o outro fio para formar a saída de -12 V. Obviamente exploraremos mais sobre esse assunto no Capítulo 31.

Casamento de Impedância

Outra aplicação comum de transformadores é no casamento (conversão) de impedância. Como estudamos no Capítulo 9, a máxima transferência de potência em circuitos de corrente alternada só ocorre quando a impedância da fonte de alimentação é a mesma da carga a ela conectada.

Caixas de som e antenas são os melhores exemplos de quando devemos casar a impedância. Esse casamento de impedância pode ser feito simplesmente rearranjando o circuito para alterar a impedância – por exemplo, alterando a configuração dos alto-falantes, capacitores e bobinas usadas como filtro para fazer com que a impedância da caixa "bata" com a impedância do amplificador de áudio, no caso de caixas de som – ou então usando-se um transformador casador de impedância.

Exemplo prático: o adaptador que converte fios de antena de 300 Ω (achatado) para 75 Ω (coaxial) é, na verdade, um pequeno transformador casador de impedância.

O cálculo de transformadores casadores de impedância é feito através da seguinte fórmula:

$$\text{Relação do número de espiras} = \frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\left(\frac{Z_P}{Z_S}\right)} \qquad (26.2)$$

Assim, vamos dizer que temos um amplificador de áudio com impedância de 2 Ω (Z_P) e uma caixa de som com impedância de 8 Ω (Z_S). Com isso temos que a relação de espiras é de 0,5. Se colocássemos uma bobina com 100 espiras no secundário, o primário deste transformador teria de ser construído com uma bobina contendo aproximadamente 50 espiras ($N_P = N_S \cdot$ relação).

Testando Transformadores

A maneira correta de testar transformadores é usando um osciloscópio. Com o aparelho onde o transformador está conectado ligado, você deverá verificar se há em seu primário uma forma de onda sendo aplicada. Em caso positivo, você deverá verificar se o transformador está produzindo, em seu secundário, a mesma forma de onda porém com amplitude maior (transformador elevador de tensão), igual (transformador isolador) ou menor (transformador abaixador de tensão). Se não houver, isto significa que o transformador está defeituoso. Obviamente se não houver uma forma de onda sendo aplicada no primário, significa que o aparelho está defeituoso ou que o transformador está em curto.

Se a tensão alternada sendo aplicada no transformador for do padrão da rede elétrica (por exemplo, transformador sendo usado em uma fonte de alimentação linear), então você poderá fazer o teste acima usando um multímetro na escala de tensão alternada. Lembrando que multímetros convencionais não conseguem ler tensões fora do padrão da rede elétrica. Ou seja, você não poderá usar um multímetro para ler valores em transformadores usados em fontes de alimentação chaveadas, pois a forma de onda aplicada é retangular de alta frequência (ver Capítulo 31).

Um teste rudimentar pode ser feito usando um ohmímetro (multímetro na escala de resistência). Com o aparelho desligado e removendo o transformador totalmente do circuito, você deverá encontrar baixa resistência ao medir individualmente as bobinas do transformador. Se o ohmímetro marcar infinito isto significa que a bobina está aberta (danificada) e o transformador, defeituoso. Além disso você deverá fazer uma medição entre as duas bobinas (uma ponteira em um dos terminais da bobina do secundário e a outra ponteira em um dos terminais da bobina do primário). Como as bobinas não devem ter qualquer contato elétrico, o ohmímetro deverá marcar infinito. Caso ele marque que há condução entre a bobina do secundário e a bobina do primário (isto é, baixa resistência), isto significa que o transformador está defeituoso.

É importante entender que este teste com um ohmímetro só verifica problemas extremos. O teste correto deve ser feito com um osciloscópio, como explicado.

◆◆◆

Exercícios

1. O que acontece se você conectar o primário de um transformador de 110 V x 12 V x 250 mA a uma pilha média de 1,5 V?
2. Quantas espiras deverá ter o secundário de um transformador para baixar 24 V em 3 V, supondo que o primário deverá ter 800 espiras?

3. Quantas espiras deverá ter o secundário de um transformador para aumentar de 24 V em 400 V, supondo que o primário deverá ter 120 espiras?
4. Qual será a tensão na saída de um transformador com 3000 espiras no primário e 100 espiras no secundário se aplicarmos 220 V em seu primário?
5. Qual será a tensão na saída de um transformador com 100 espiras no primário e 20.000 espiras no secundário se aplicarmos 12 V em seu primário?
6. Qual é a tensão que obteremos na saída de um transformador 110 V x 9 V se o conectarmos invertido na tomada, isto é, se ligarmos o secundário na rede elétrica, em vez de o primário?
7. Calcule o número de espiras que o secundário de um transformador com múltiplas saídas (5 V, 12 V e 18 V) deverá ter, supondo 380 V no primário e um primário com 10.000 espiras.
8. Calcule o número de espiras que um transformador casador de impedância deverá ter supondo um circuito amplificador com 500 Ω de impedância em sua saída e uma caixa de som de 8 Ω. Suponha ainda que o primário tem 1.000 espiras.

Capítulo 27
Diodos

Introdução

Os diodos, também chamados retificadores, são componentes eletrônicos que permitem a passagem da corrente elétrica em um só sentido, bloqueando correntes vindas em sentido oposto. Existem inúmeras aplicações para os diodos, que estudaremos mais adiante. Todo diodo tem polaridade. O polo positivo é chamado anodo e o negativo, catodo. Fisicamente falando, todo diodo possui uma marcação (uma faixa) próxima ao seu catodo (polo negativo) – ver Figura 27.1. Em seu símbolo, a barra indica o catodo (polo negativo).

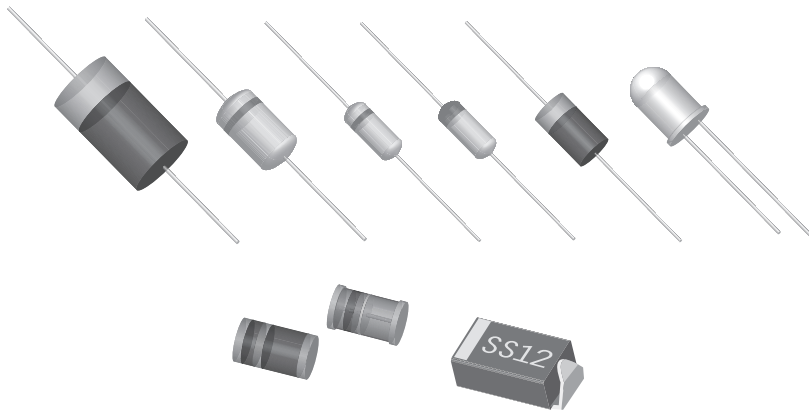


Figura 27.1: Diodos.

Existem vários tipos de diodos. Quando falamos somente "diodo", estamos nos referindo ao diodo de junção bipolar, também conhecido como diodo de sinal, que é o tipo mais comum de diodo.

O diodo é o mais simples dos dispositivos semicondutores. Isto é, dependendo da maneira com que a tensão elétrica é aplicada sobre ele, o diodo pode funcionar como um condutor ou como um isolante, e daí o nome *semicondutor*. Além do diodo, tiristores, transistores e circuitos integrados, entre outros componentes, também são construídos a partir de materiais semicondutores. Por isso, veremos a seguir como os semicondutores funcionam e são construídos, para que você possa entender não só o funcionamento dos diodos, mas também dos outros componentes semicondutores.

Antigamente, quando os componentes semicondutores ainda não haviam sido inventados, componentes chamados válvulas eram usados no lugar de diodos e transistores. As válvulas consumiam muita corrente, eram alimentadas com tensões altas, esquentavam, eram fisicamente grandes e quebravam caso fossem vítimas de um choque mecânico (caso caíssem no chão, por exemplo), já que fisicamente eram envoltas por uma ampola de vidro. Desde que os componentes semicondutores passaram a ser usados no lugar das válvulas, essa nova geração de componentes eletrônicos passou a ser chamada de *eletrônica do estado sólido*.

Simbologia

Na Figura 27.2 apresentamos a simbologia usada por diodos. A linha reta (barra) indica o catodo (polo negativo). O DIAC não tem polaridade e por isso possui barras desenhadas em seus dois terminais. Repare como o símbolo do diodo assemelha-se a uma seta, que indica o sentido em que a corrente pode passar (corrente no sentido convencional).

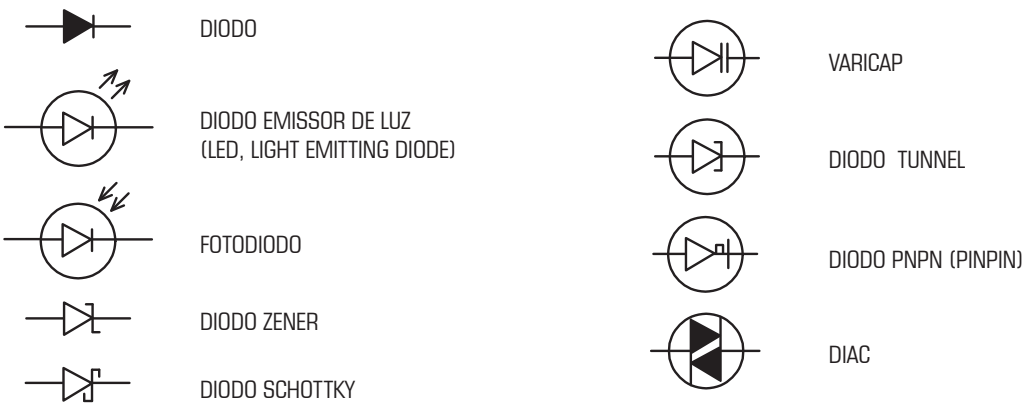


Figura 27.2: Simbologia usada por diodos.

Funcionamento de Dispositivos Semicondutores

Como dissemos, diodos, tiristores, transistores, circuitos integrados e outros componentes são construídos a partir de materiais semicondutores. Para entender como esses componentes funcionam, é necessário entender o funcionamento dos materiais semicondutores.

Um semicondutor é um material que, dependendo da tensão elétrica aplicada, pode ser um condutor (deixando a corrente elétrica passar) ou pode ser um isolante (bloqueando a corrente elétrica) – daí o seu nome.

Ocorre que materiais semicondutores não existem na natureza. Eles são construídos quimicamente em laboratório. Isso é feito pegando-se como base um material que possua uma estrutura cristalina bastante conhecida e que seja abundante na natureza. Purificando esse cristal, a partir de uma técnica genericamente conhecida como *dopagem*, ele é transformado em um material semicondutor.

Esse material usado como base pode ser o germânio (Ge) ou o silício (Si). Atualmente, o material mais usado para formar a base do material semicondutor é o silício, especialmente por conta do fato de ele ser extremamente abundante na natureza (pois é retirado da areia). Mas nem o germânio nem o silício são materiais semicondutores. Eles formam somente a base para os materiais semicondutores serem fabricados.

Tanto o germânio como o silício possuem quatro elétrons livres em sua camada de valência. Com isso, eles conseguem formar até quatro ligações do tipo covalente (em outras palavras, se você nunca estudou química: ele precisará se juntar a mais quatro elétrons para ficar em equilíbrio). A estrutura cristalina do silício e do germânio em seu estado puro é mostrada na Figura 27.3.

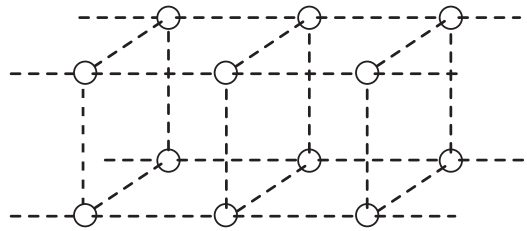


Figura 27.3: Estrutura cristalina do germânio e do silício.

Através do processo de *dopagem*, alguns átomos de silício ou germânio são trocados por átomos de outros elementos químicos. Esses átomos de outros elementos químicos são chamados de *impurezas*.

Se um átomo de germânio ou silício for substituído por um átomo de um material químico que tenha cinco elétrons livres em sua última camada – como o fósforo, o arsênio, o antimônio e o bismuto – haverá um elétron sobrando na estrutura cristalina para cada impureza inserida, já que a estrutura cristalina está em equilíbrio quando os átomos possuem quatro elétrons livres cada. O material químico formado nesse processo de dopagem é chamado *material do tipo N* e sua característica é possuir elétrons sobrando em sua estrutura. Os átomos que trazem esses elétrons sobrando também são chamados *impurezas doadoras* ou *portadoras negativas*.

Já se fizermos com que um átomo de germânio ou silício seja substituído por um átomo de um material químico que tenha três elétrons livres em sua última camada – como o boro, o gálio e o índio – haverá a falta de um elétron para tornar a estrutura equilibrada. O material químico formado nesse processo de dopagem é chamado *material do tipo P* e sua característica é possuir lacunas sobrando em sua estrutura. Lacunas são espaços necessitando receber elétrons para manter o seu equilíbrio químico. As lacunas também são chamadas *impurezas aceitadoras, impurezas receptoras* ou *portadoras positivas*.

Basta lembrar que o material do tipo N é negativo, isto é, possui excesso de elétrons, e que o material do tipo P é positivo, isto é, possui falta de elétrons, e você não terá dificuldades de entender o funcionamento de componentes semicondutores.

No tipo mais simples e usual de diodo – o diodo de junção bipolar – um pedaço de material P é "colado" a um pedaço de material N. A área de contato entre os dois materiais é chamada *junção* e daí o nome desse tipo de diodo.

Na área próxima da junção, os elétrons livres do lado do material N e as lacunas livres do lado do material P tendem a se atrair, fazendo com que os elétrons livres ultrapassem a junção para se encontrarem com as lacunas e entrarem em equilíbrio. Basta lembrar que as lacunas do material P estão precisando de elétrons para manter o equilíbrio da estrutura cristalina do material, enquanto que os elétrons do material N estão "sobrando" e precisam ser "eliminados" para que o equilíbrio da estrutura cristalina seja mantido. Os elétrons livres e as lacunas que estão mais distantes da junção não conseguem fazer o mesmo. Com isso, é naturalmente criada uma área chamada *barreira de potencial*, *barreira de junção* ou *zona de depleção*. Na Figura 27.4 nós mostramos isso. Ou seja, próximo à junção, não existem nem elétrons sobrando nem lacunas. No desenho nós exageramos o tamanho da zona de depleção. Essa área é muito pequena, na ordem de 0,5 μm em um diodo de junção típico.

Para fazer com que elétrons consigam circular dentro de um diodo, é necessário vencer a barreira de potencial. Se o diodo for polarizado diretamente, isto é, o material tipo N ligado ao polo negativo da fonte de alimentação e o material tipo P ligado ao polo positivo da fonte de alimentação, os elétrons vindos da fonte de alimentação repelirão os elétrons livres presentes dentro do material tipo N, forçando-os em direção à junção, diminuindo a barreira de potencial. Chega

um momento em que a barreira de potencial acaba e os elétrons livres conseguem finalmente passar do material N para o material P (ver Figura 27.5). Esse momento ocorre normalmente quando a tensão da fonte de alimentação está na faixa de 0,7 V (no caso de semicondutores baseados em silício; no caso do germânio essa tensão é normalmente por volta de 0,3 V). Em alguns tipos de diodos (por exemplo, os do tipo Schottky) e alguns tipos de transistores a tensão necessária para que a junção passe a conduzir é menor do que 0,7 V.

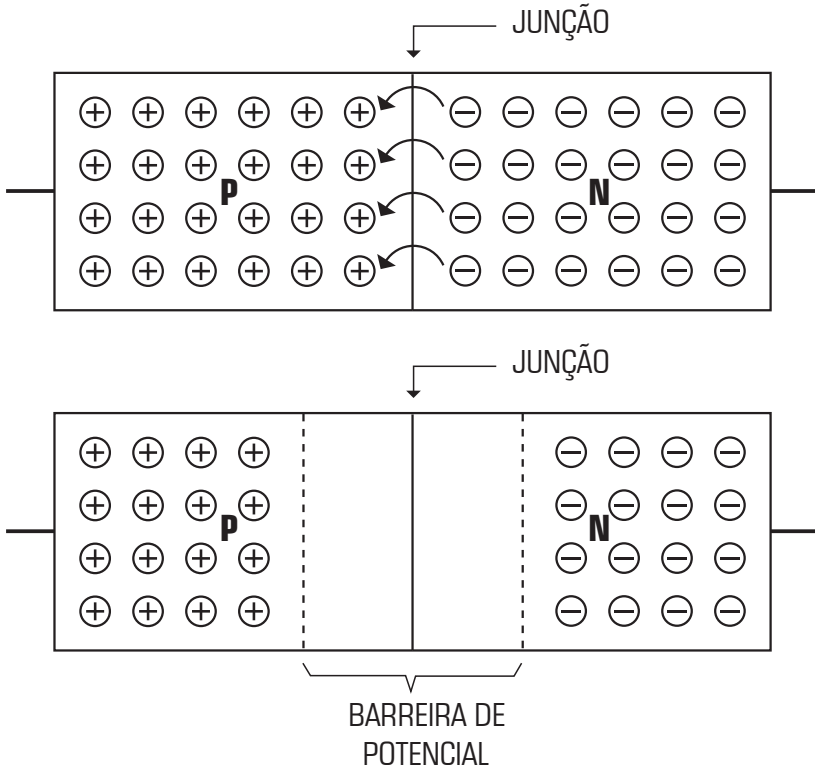


Figura 27.4: Estrutura interna de um diodo de junção.

Já quando o diodo está polarizado inversamente, os elétrons livres do material tipo N tenderão a ir para o polo positivo da fonte em vez de atravessarem o diodo. Isso fará com que a barreira de potencial, em vez de diminuir, aumente, fazendo com que nenhuma corrente circule no diodo

quando ele está inversamente polarizado. Na Figura 27.5 nós mostramos o que ocorre internamente com um diodo quando ele está polarizado direta e inversamente. Na Figura 27.6, nós resumimos esquematicamente o que ocorre com um circuito quando um diodo está polarizado direta e inversamente.

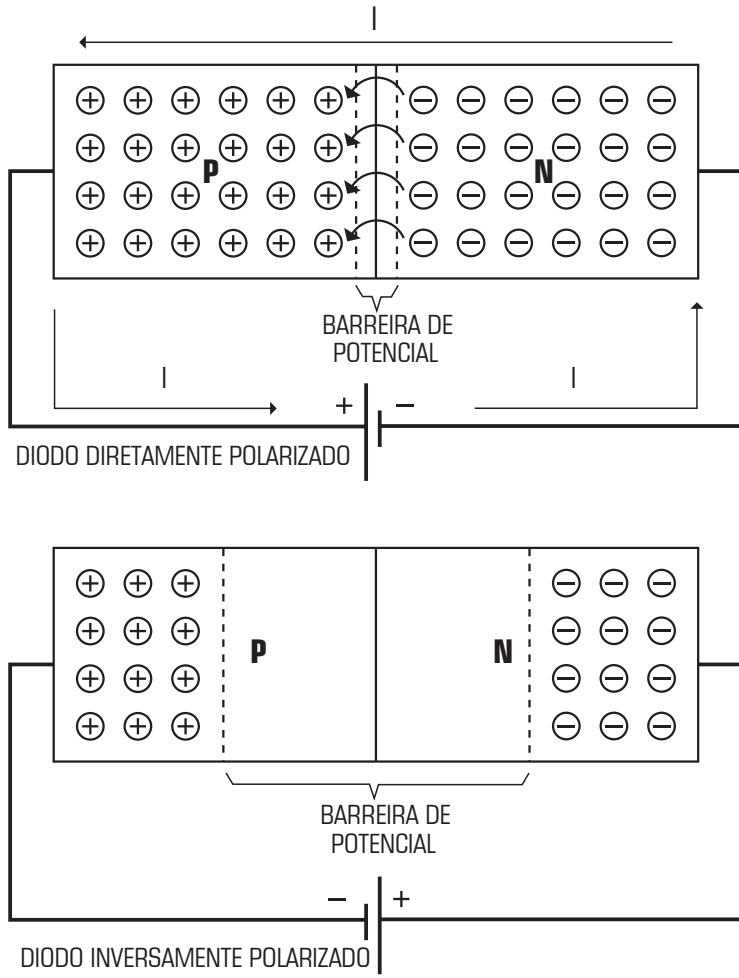


Figura 27.5: Funcionamento interno de um diodo.

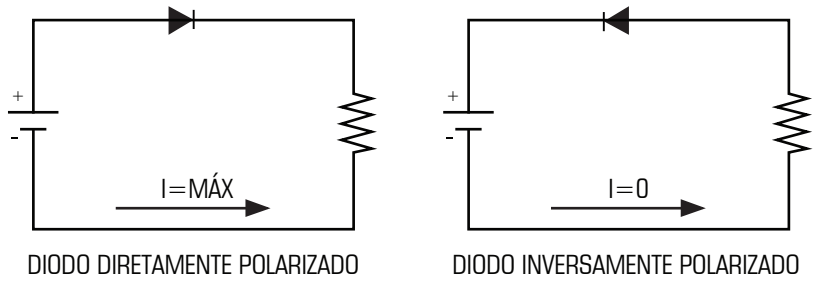


Figura 27.6: Funcionamento de um diodo na prática.

Na realidade nenhum dispositivo semicondutor é "perfeito" e, quando a junção PN está inversamente polarizada, uma pequena corrente é capaz de "escapar". Esta pequena corrente é chamada *corrente de fuga* e normalmente podemos considerá-la como desprezível, de tão pequena que é, mas há aplicações onde temos de considerá-la. A corrente de fuga depende da qualidade da dopagem e da temperatura da junção. Isso ocorre porque com um aumento na temperatura elétrons são mais facilmente "despregados" do material do tipo N.

Demos exemplo de como materiais semicondutores funcionam com diodo, pois é o assunto deste tópico. Outros componentes semicondutores funcionam de forma similar, porém têm mais junções PN. Por exemplo, transistores do tipo NPN são componentes com três pedaços de material semicondutor "colados": dois pedaços N com um pedaço P no meio dos dois. Ou seja, entender o funcionamento interno do diodo de junção é o ponto de partida para compreender o funcionamento de qualquer outro componente semicondutor.

Diodo de Junção

Como acabamos de ver, o diodo é o dispositivo semicondutor mais simples que existe. Ele é simplesmente uma junção de um pedaço de material P com um pedaço de material N. O ponto onde o material P e o material N se juntam é justamente chamado *junção* e daí o nome diodo de junção. Para entender como um diodo de junção funciona internamente, leia o tópico anterior.

Apenas resumindo o que vimos, quando um diodo está diretamente polarizado, isto é, a tensão aplicada em seu polo negativo (catodo) é mais negativa do que a tensão aplicada em seu polo positivo (anodo) – ou, em outras palavras, quando o polo negativo coincide com o negativo da fonte de alimentação e o positivo coincide com o positivo da fonte de alimentação –, haverá passagem de corrente elétrica, isto é, o diodo funcionará como um condutor.

Já quando um diodo está inversamente polarizado, isto é, a tensão aplicada em seu polo positivo (anodo) é mais negativa do que a tensão aplicada em seu polo negativo (catodo) – ou, em outras palavras, quando a polaridade do diodo está invertida em relação à polaridade da fonte de alimentação – não haverá passagem de corrente elétrica, isto é, o diodo funcionará como um isolante. Na Figura 27.6 nós resumimos o funcionamento do diodo.

Vimos que, quando o diodo está diretamente polarizado, a corrente só começa a circular por ele quando a barreira de potencial é quebrada, isto é, somente após um determinado nível de tensão. Em dispositivos feitos à base de germânio, essa tensão é normalmente na faixa de 0,3 V. Em dispositivos feitos à base de silício, essa tensão é normalmente na faixa de 0,7 V (ela normalmente varia entre 0,5 V e 0,8 V dependendo do diodo; para efeitos de cálculo, normalmente consideramos o valor 0,7 V).

Ou seja, supondo que o diodo da Figura 27.6 seja de silício, só haverá corrente no circuito polarizado diretamente caso a fonte forneça mais do que 0,7 V. Se a fonte for de 0,5 V, por exemplo, essa tensão não será suficiente para "quebrar" a barreira de potencial do diodo e ele não conduzirá, mesmo que polarizado diretamente.

Essa tensão de 0,7 V é a queda de tensão sobre o diodo, é o quanto a barreira de potencial do diodo "consome" para poder "funcionar" (isto é, conduzir). Se a fonte da Figura 27.6 for de 3 V, então teremos 2,3 V sobre o resistor e 0,7 V sobre o diodo. Ou seja, não podemos nos esquecer que parte da tensão aplicada no circuito será "consumida" pelo diodo.

Características

Diodos são vendidos de acordo com uma série de parâmetros, entre os quais destacamos:

- **Tensão máxima reversa (V_R, "continuous reverse voltage"):** É a tensão máxima que o diodo suporta quando polarizado inversamente. Se esta tensão for ultrapassada, o diodo queimará, normalmente fazendo com que ele fique em curto, isto é, transforme-se em um mero pedaço de fio. Voltaremos a falar sobre isso no tópico *Testando Diodos de Junção*.
- **Corrente máxima direta (I_F, "continuous forward current"):** É a corrente máxima que o diodo "aguenta". Se esta corrente for ultrapassada, o diodo queima, normalmente fazendo com que ele fique em curto.
- **Tensão de condução ou queda de tensão (V_F, "forward voltage"):** É a tensão mínima aplicada sobre o diodo, quando este está polarizado diretamente, que o fará conduzir. É a queda de tensão do diodo, isto é, a tensão "consumida" pelo diodo quando ele está conduzindo. É importante notar que o valor normalmente publicado para este parâmetro é o valor que o fabricante define para a pior das hipóteses e, na prática, o valor da queda de tensão depen-

derá da temperatura, corrente e tensão aplicadas no diodo, sendo normalmente mais baixo do que o publicado.

- **Corrente de fuga (I_R, "reverse current"):** É a corrente que o diodo deixa passar quando ele está inversamente polarizado e, teoricamente, não deixando nenhuma corrente passar.
- **Velocidade (t_{rr}, "reverse recovery time"):** É o tempo típico que o diodo demora para responder a uma inversão de polaridade em seus terminais.

Esses parâmetros variam de acordo com o modelo do diodo e estão listados no manual técnico do diodo, que é chamado *data sheet* (literalmente, "folha de dados"), disponível no site do fabricante do diodo. Existem diversos outros parâmetros publicados no *data sheet* de um diodo, e destacamos apenas os principais. Como esses documentos técnicos estão disponíveis apenas em inglês, nós grafamos o nome dos parâmetros também em inglês.

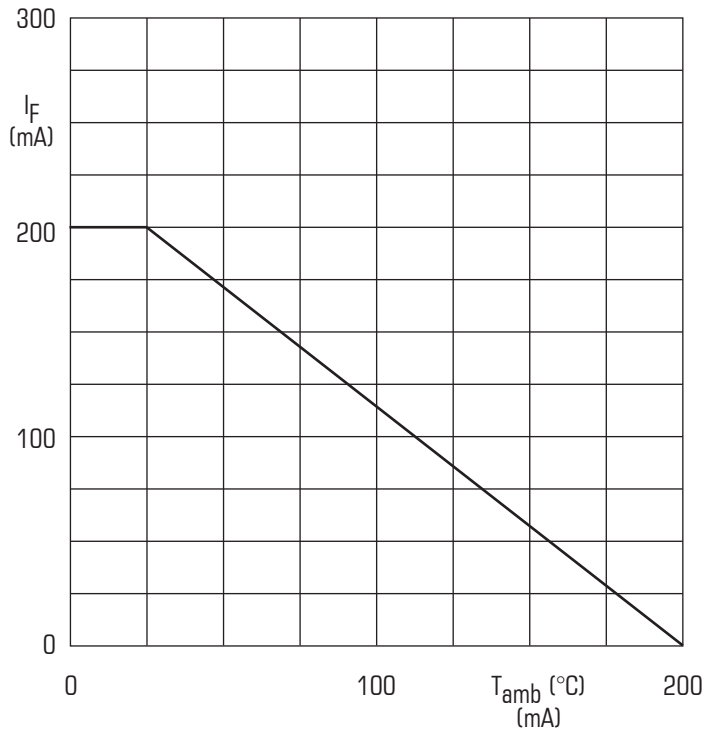


Figura 27.7: Curva de *de-rating* do diodo 1N4148.

Um detalhe importante e que muitas vezes é esquecido é saber a temperatura sob a qual o fabricante do componente coletou os dados publicados. Por padrão, fabricantes usam uma temperatura ambiente de 25º C para essa coleta de dado, só que dispositivos semicondutores perdem a sua capacidade de entregar corrente na medida em que a temperatura aumenta, um fenômeno conhecido, em inglês, como *de-rating*. Normalmente os fabricantes publicam uma curva de *de-rating* em seus data sheets.

Para um exemplo real, considere a Figura 27.7, que é a curva de *de-rating* de um diodo chamado 1N4148, que é um diodo bastante popular. O que este gráfico quer dizer? Observe-o atentamente e você verá que a corrente máxima suportada por este diodo é de 200 mA, porém este diodo é rotulado a 25º C. Na medida em que a temperatura aumenta, o limite de corrente do diodo diminui. Neste caso, quando a temperatura ambiente sobe para 50º C, a corrente máxima suportada pelo diodo cai para aproximadamente 175 mA.

Desta forma, ao projetar circuitos, a temperatura dentro do circuito deverá ser levada em consideração na hora de escolher o diodo (ou qualquer outro dispositivo semicondutor, como transistores).

O *data sheet* de um diodo apresenta vários outros gráficos, a depender do fabricante do componente. Na Figura 27.8 nós vemos o exemplo de uma curva característica de um diodo hipotético. Observe que é um gráfico tensão *versus* corrente. Na prática, fabricantes podem dividir esta curva em dois gráficos separados, um para a polarização direta e outro para a polarização inversa.

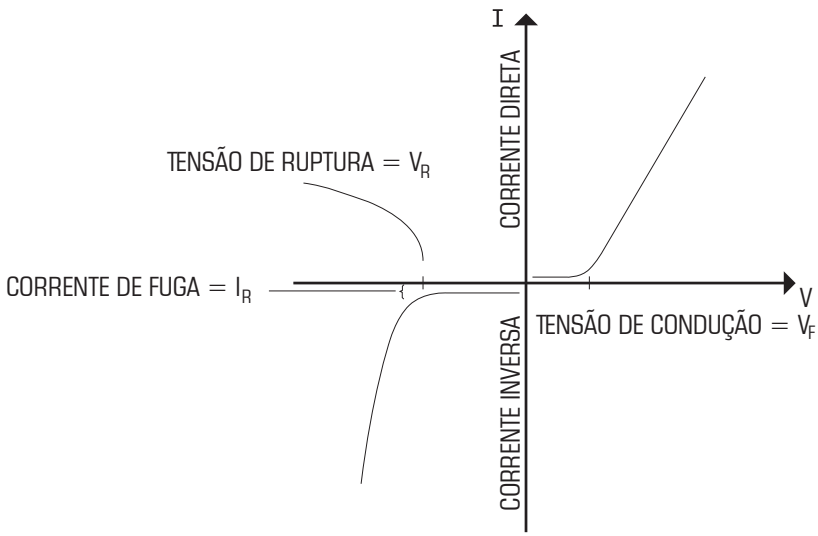


Figura 27.8: Curva característica de um diodo.

A tensão de condução (V_F) normalmente varia entre 0,5 V e 0,8 V, dependendo do diodo. Observamos, na prática, que diodos que suportam uma corrente maior normalmente possuem uma tensão de condução mais baixa (0,5 V, 0,6 V), enquanto que diodos de baixa corrente normalmente possuem uma tensão de condução maior (0,7 V, 0,8 V). Quando o diodo está polarizado diretamente, a corrente passa a crescer de acordo com a tensão, após a tensão de condução ter sido atingida. Obviamente, o diodo está limitado à sua corrente máxima. Se ultrapassarmos a sua corrente máxima, o diodo queimará.

Já na curva de polarização inversa (corrente reversa), nós vemos claramente a existência da corrente de fuga (I_R), isto é, uma pequena corrente que acaba escapando quando o diodo está polarizado inversamente – o que em teoria não deveria ocorrer. Se a corrente de fuga não existisse, a curva da corrente reversa estaria sobre o eixo zero (indicando uma corrente de zero ampère, ou seja, inexistência de corrente de fuga). Mas vemos que existe uma pequena corrente quando o diodo está polarizado inversamente. Essa corrente de fuga é normalmente muito baixa, na faixa de microampères ou mesmo nanoampères, sendo normalmente desconsiderada em cálculos práticos.

Vemos também a tensão de ruptura do diodo (V_R). Essa tensão é a tensão máxima que o diodo suporta quando polarizado inversamente. Supondo, por exemplo, que um diodo suporte no máximo uma tensão reversa de 100 V, ele se queimará se lhe aplicarmos mais do que isso. Veja como, no gráfico, o diodo passa a conduzir normalmente após ser aplicada, sobre o diodo, uma tensão maior do que a sua tensão de ruptura (V_R).

Nomenclatura

Os diodos de junção são vendidos no mercado através de códigos, que são seus "nomes". Você terá de procurar, na Internet (ex.: Google), pelo nome do diodo para encontrar o seu *data sheet* e, com isso, descobrir os seus parâmetros. Somente pelo nome do diodo é normalmente impossível saber suas características. É claro que, depois de um determinado momento, você acabará memorizando as características dos componentes mais usuais.

Há alguns diodos que são mais "famosos" do que outros, pois são diodos de uso geral "populares". Na Tabela 27.1 publicamos as características básicas dos diodos mais comuns no hobby. É importante notar que o valor para a queda de tensão (V_F) é o valor máximo possível, publicado para a pior das hipóteses. Por isso que, apesar de o valor publicado para esses diodos ser de 1 V, normalmente você verá, na prática, uma queda de tensão em torno de 0,7 V para esses diodos. Na hora de projetar um circuito, no entanto, você deverá considerar o valor "para a pior das hipóteses".

Tabela 27.1: Características dos diodos mais populares.

Diodo	I_F	V_R	V_F	I_R
1N4001	1 A	50 V	1 V	5 μA
1N4002	1 A	100 V	1 V	5 μA
1N4003	1 A	200 V	1 V	5 μA
1N4004	1 A	400 V	1 V	5 μA
1N4005	1 A	600 V	1 V	5 μA
1N4006	1 A	800 V	1 V	5 μA
1N4007	1 A	1000 V	1 V	5 μA
1N4148	200 mA	100 V	1 V	25 nA

Todos os componentes cujos nomes começam com 1N são diodos, já que 1N significa 1 junção PN. Esta nomenclatura é a padrão usada por fabricantes norte-americanos e, por isso, é também conhecida como "nomenclatura americana".

Diodos SMD

Dispositivos de montagem em superfície (SMD, Surface Mount Device) são componentes de tamanho físico bastante reduzido (ver componentes inferiores na Figura 27.1), que são soldados a placas de circuito impresso através de ferramentas robóticas. Este tipo de componente, portanto, não é voltado ao hobista.

Diodos que usam este tipo de tecnologia possuem uma listra indicando o catodo (polo negativo) do componente. Por causa do tamanho reduzido deste tipo de componente, não há espaço físico para a impressão do nome real do componente, apenas um código, e este código não é padronizado. Para saber qual é o "nome" de um diodo SMD, você deverá pesquisar na Internet, e o decodificador existente em http://www.marsport.org.uk/smd é um ponto de partida.

Alguns diodos SMD são fisicamente parecidos com capacitores SMD. Neste caso a diferenciação entre os dois é facilmente feita pelo que há estampado. Se você conseguir decodificar os dados impressos conforme descrito no tópico *Capacitores SMD* do Capítulo 24, então você está diante de um capacitor, e do contrário possivelmente está diante de um diodo.

No caso de diodos SMD com encapsulamento de vidro contendo listras coloridas, o componente é um diodo Zener. Abordaremos mais adiante sua decodificação.

Aplicações

Vamos estudar três aplicações bastante corriqueiras em que diodos são usados: circuitos retificadores, como elemento para forçar uma determinada queda de tensão e como proteção em circuitos que usem solenoides. Existem outras aplicações, é claro, mas estas são as mais comuns.

Circuitos Retificadores

Existem várias aplicações importantes para diodos de junção. A aplicação mais conhecida é como circuito retificador, peça fundamental na conversão de tensão alternada em tensão contínua. Na Figura 27.9 mostramos as três formas clássicas de se formar um circuito retificador: o retificador de meia-onda, que usa apenas um diodo e que corta o semiciclo negativo da forma de onda aplicada na entrada (note que a forma de onda resultante possui uma defasagem de 180º em relação à entrada – ver capítulo passado para entender); o retificador de onda completa usando dois diodos e um transformador com "center tape" (ver capítulo passado), que inverte o semiciclo negativo da forma de onda aplicada na entrada em um semiciclo positivo; e o retificador de onda completa usando quatro diodos (circuito chamado ponte retificadora), que funciona similarmente ao circuito que usa dois diodos, porém o transformador não necessita ter o "center tape".

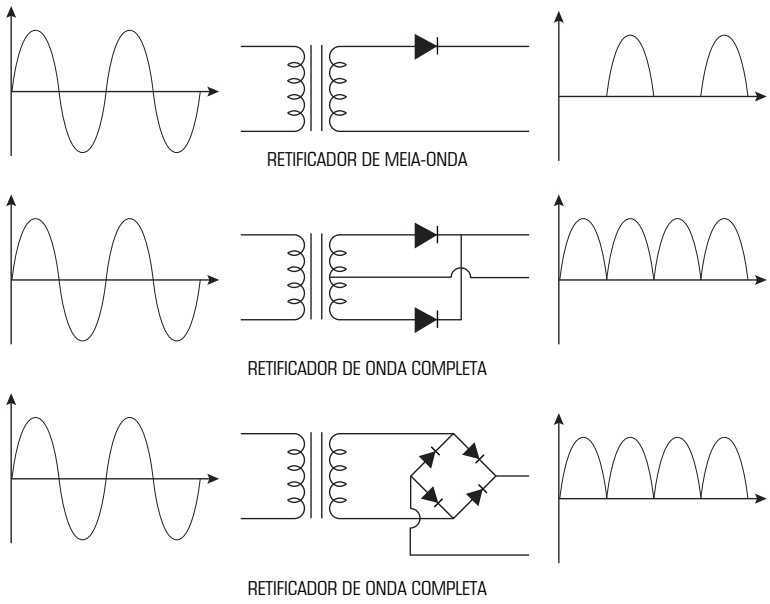


Figura 27.9: Circuitos retificadores.

Note que na saída do circuito retificador a tensão ainda não está contínua; ela está em uma forma de onda chamada *pulsante*. Para transformar a forma de onda pulsante em contínua ainda são necessários outros circuitos (um circuito de filtro, usando um capacitor, e um circuito regulador de tensão, que pode ser feito usando um diodo Zener; no Capítulo 31 estudaremos em detalhes uma fonte de alimentação).

No mercado são vendidas também pontes retificadoras já prontas, isto é, um componente contendo internamente os quatro diodos, com quatro terminais, dois marcados com ~ (que devem ser ligados à entrada de tensão alternada), um marcado com + (saída positiva) e outro marcado com - (saída negativa). Ver Figura 27.10.

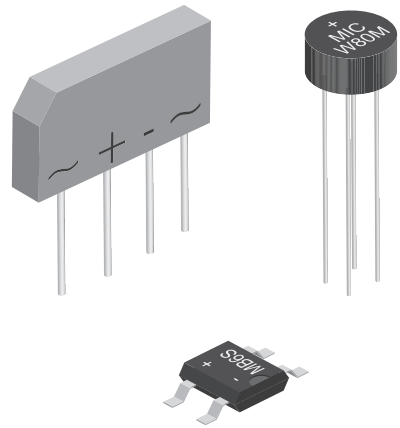


Figura 27.10: Pontes retificadoras. Quatro diodos em um só encapsulamento.

Forçando uma Queda de Tensão

Outro uso bastante interessante que pode ser dado a diodos é como um elemento para forçar uma queda de tensão de 0,7 V. Por exemplo, se você precisar que em um determinado ponto do circuito tenha 1,4 V a menos do que a tensão da fonte, basta ligar dois diodos polarizados diretamente em série para obter essa queda de tensão.

Proteção Contra Descarga de Bobinas

E, em circuitos que usem solenoides (bobinas usadas como eletroímãs), como, por exemplo, relés, um diodo é sempre colocado em paralelo ao solenoide de modo que a bobina não induza corrente

no circuito, o que faria com que ele não funcionasse ou mesmo fosse queimado (assim que a alimentação no solenoide é cortada, a parte móvel inserida dentro do solenoide retornará à sua posição de descanso; esse movimento fará com que corrente seja induzida na bobina). Nesse caso, o diodo deverá ser instalado polarizado inversamente em relação à fonte de alimentação, como mostramos na Figura 27.11. Esta aplicação é também conhecida como "giro livre" ou "freewheel".

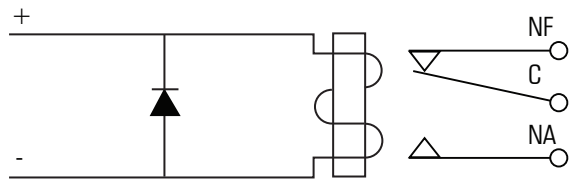


Figura 27.11: Diodo como circuito de proteção em circuitos usando solenoides (no caso, um relé).

Testando Diodos de Junção

Se você aplicar uma tensão maior do que a máxima suportada pelo diodo (por exemplo, usar um diodo 1N4001 que suporta no máximo 50 V em um circuito alimentado diretamente com 127 V) ou o seu circuito exigir uma corrente muito maior do que a máxima suportada pelo diodo (por exemplo, usar diodos 1N4148 que fornecem no máximo 200 mA em um circuito retificador conectado a um circuito que consome 1 A), ele se queimará.

Existem duas situações para um diodo queimado: ele estar aberto ou ele estar em curto. No primeiro caso, ele não conduz corrente mesmo quando polarizado diretamente. Já no segundo caso (que é o mais comum), ele conduz corrente nos dois sentidos, não bloqueando a corrente quando está polarizado inversamente, funcionando como se fosse um simples pedaço de fio.

O teste de diodos pode ser facilmente executado com o auxílio de um multímetro. Para isso, o diodo deverá estar fora do circuito a ser medido, ou pelo menos com um dos seus terminais levantados. O circuito deverá estar desligado.

Usando um Multímetro Analógico

Usando um multímetro analógico, você deverá colocá-lo na escala de resistência, de preferência baixa (x1 ou x100). Se você usar uma escala alta e segurar com os dedos as pontas de prova do multímetro, este lerá a resistência da sua pele e não a resistência do diodo. Usando um multímetro analógico, as pontas de prova são invertidas internamente, isto é, a ponteira vermelha,

que normalmente indica polo positivo, para o teste de diodos indicará polo negativo, enquanto que a ponteira preta, que normalmente indica polo negativo, para o teste de diodos indicará polo positivo. Isso não ocorre no multímetro digital.

O teste consiste no seguinte: quando polarizado diretamente, o multímetro deverá indicar baixa resistência (indicando que o diodo está deixando passar corrente), enquanto que, quando polarizado inversamente, o multímetro deverá indicar alta resistência (indicando que o diodo não está deixando passar corrente). A Figura 27.12 ilustra como o teste de diodos deve ser feito usando um multímetro analógico.

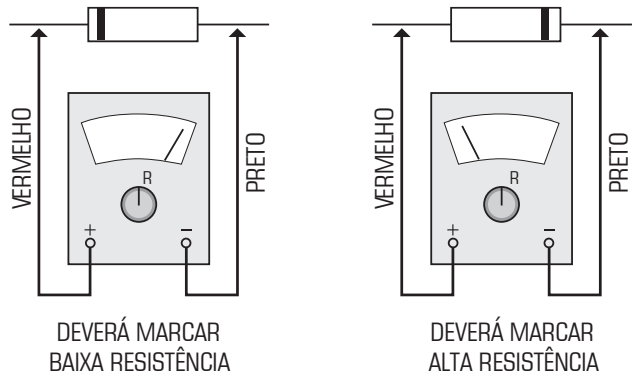


Figura 27.12: Testando diodos com multímetro analógico.

Caso o diodo apresente baixa resistência nos dois sentidos, isso significa que ele está em curto. Caso ele apresente alta resistência nos dois sentidos, isso significa que ele está aberto. Nos dois casos o diodo está queimado e deverá ser jogado fora e substituído.

Usando um Multímetro Digital

Usando um multímetro digital, ele deverá ser posicionado na escala de teste de diodos (posição que possui um símbolo de diodo). Quando polarizado inversamente, o multímetro deverá indicar infinito ("1. "), indicando que o diodo não está deixando passar corrente. Quando polarizado diretamente, o multímetro deverá indicar a queda de tensão sobre o diodo, que normalmente será entre 0,5 V e 0,8 V no caso de diodos de silício, indicando que o diodo está deixando passar corrente quando polarizado diretamente. A Figura 27.13 ilustra como o teste de diodos deve ser feito usando um multímetro digital.

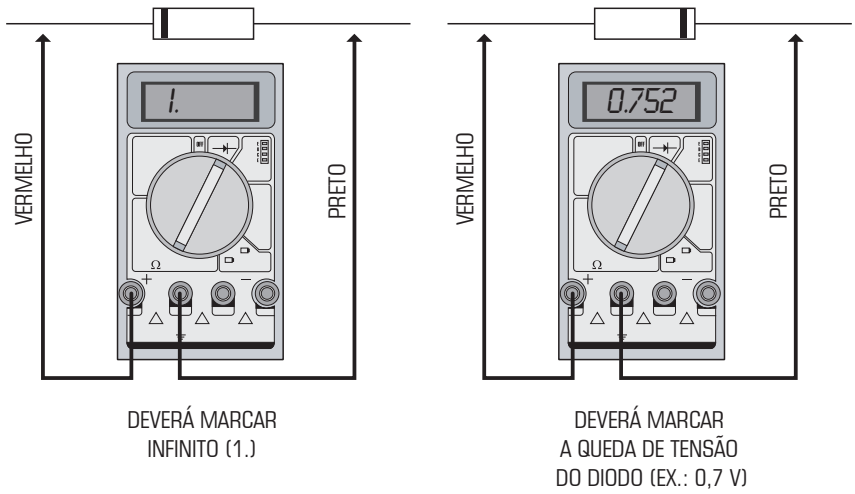


Figura 27.13: Testando diodos com multímetro digital.

Caso o diodo apresente "zero" nos dois sentidos, isso significa que ele está em curto. Caso ele apresente resistência infinita nos dois sentidos, isso significa que ele está aberto. Nos dois casos o diodo está queimado e deverá ser jogado fora e substituído.

Diodo Emissor de Luz (LED, Light Emitting Diode)

O LED (Light Emitting Diode, Diodo Emissor de Luz) é um diodo que emite luz quando passa corrente por ele. Aparentemente, um LED se assemelha a uma lâmpada, mas a única coisa em comum entre o LED e uma lâmpada é que ambos emitem luz. Para começar, um LED é um componente de estado sólido, ao contrário de uma lâmpada, que quebra ao cair no chão, por exemplo. Sendo um diodo, LEDs possuem polaridade. E, por fim, o mais importante: se ligarmos um LED diretamente a uma fonte de tensão, ele queima, já que a sua resistência elétrica é muito baixa. É por esse motivo que muitos leigos queimam LEDs por aí.

Como, para acender, o LED deve estar diretamente polarizado, em teoria ele dará um curto-ciruito na fonte de alimentação se for ligado diretamente a ela (se você ligar um diodo de junção diretamente polarizado a uma fonte de alimentação dará um curto-circuito na fonte, não é mesmo?). Podemos explicar isso de outra forma: se ligarmos um LED diretamente a uma fonte de alimentação, a corrente do circuito será muito superior à corrente máxima do LED, fazendo com que ele se queime.

Dessa forma, um LED sempre deverá ser usado com um resistor ligado em série. O valor desse resistor é fácil de ser calculado pela fórmula 27.1, onde V_{CC} é a tensão da fonte de alimentação, V_F é a queda de tensão do LED e I é a corrente que você quer que passe pelo LED.

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I} \quad (27.1)$$

Enquanto diodos comuns têm queda de tensão por volta de 0,7 V, LEDs possuem queda de tensão muito maior, entre 1,4 V e 3,6 V. O valor exato deve ser visto no *data sheet* do componente (parâmetro V_F). Caso você não tenha ideia do valor a ser usado, considere 3 V.

Em relação à corrente a ser usada, no *data sheet* do LED haverá dois valores, a sua corrente máxima (I_F) e a corrente de teste, que foi a corrente usada pelo fabricante ao testar o dispositivo para montar o seu *data sheet*, sendo esta a corrente recomendada (você não deve usar a corrente máxima neste cálculo ou, do contrário, qualquer variação na tensão fornecida poderá queimar o LED, pelo aumento da corrente que passará a circular por ele). Se você não tiver a menor ideia da corrente que quer que passe pelo LED, use 15 mA, que é um valor típico.

O resistor deverá ter um valor igual ou ligeiramente superior ao valor calculado.

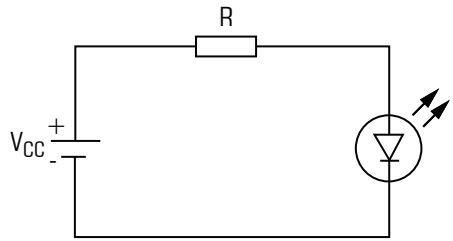


Figura 27.14: Maneira correta de se ligar um LED.

Visualmente o polo negativo (catodo) de um LED pode ser determinado pela existência de um pequeno chanfrado ao seu lado ou pelo comprimento de seu terminal, que é mais curto que o anodo.

Figura 27.15: Determinando visualmente os polos de um LED.

Os LEDs são vendidos em uma variedade incrível de cores, formatos e tamanhos. A escolha do tipo de LED a ser usado em um determinado circuito fica a critério puramente estético.

Displays de Sete Segmentos

Existem ainda os famosos displays de sete segmentos. Esses displays são vários LEDs juntos em uma única peça, formando o dígito 8. Com um display de sete segmentos é possível montar qualquer número de 0 a 9 (e até mesmo algumas letras, se você for criativo o suficiente), bastando para isso alimentar os LEDs correspondentes. Na Figura 27.16 nós vemos um display de sete segmentos típico. Cada LED do display é marcado de "a" a "g", além do ponto existente em alguns displays.

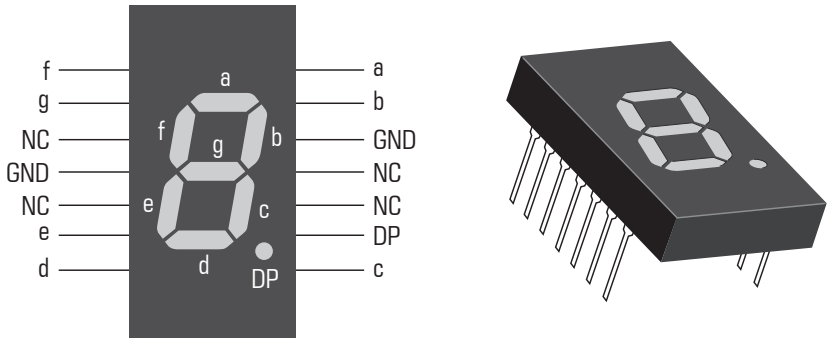


Figura 27.16: Exemplo de display de 7 segmentos (catodo comum).

A posição dos terminais de um display varia de acordo com o seu modelo e fabricante. O display da Figura 27.16 é apenas um exemplo ilustrativo, e a posição dos terminais de um display que você eventualmente possa ter em mãos pode ser diferente da ilustrada na Figura 27.16.

Existem dois tipos de display: catodo comum e anodo comum. No primeiro tipo, os catodos de todos os LEDs são conectados a um só terminal, o terra. Em outras palavras, o negativo da fonte de alimentação deverá ser conectado ao terra do display e o positivo, aos LEDs que você deseja acender (usando um resistor em série para cada LED, como estudamos anteriormente). No se-

gundo tipo, os anodos de todos os LEDs são conectados a um só terminal, o V_{CC}. Nesse caso, o positivo da fonte de alimentação deverá ser conectado ao V_{CC} do display e o negativo, aos LEDs que você deseja acender (usando um resistor em série para cada LED).

Testando LEDs

LEDs podem ser testados com um multímetro, conforme já explicado no tópico *Testando Diodos de Junção*. Adicionalmente você pode montar o circuito da Figura 27.14, conectando um resistor de 270 Ω em série com o LED e alimentando o circuito com duas pilhas de 1,5 V conectadas em série (ou uma fonte de alimentação; no caso de usar fontes de valor mais alto, você terá de aumentar o valor do resistor) e ver se ele se acende (não esqueça de "casar" a polaridade do LED com a polaridade das pilhas ou da fonte).

Diodo Zener

O diodo Zener é um diodo que funciona de maneira similar a um diodo de junção comum, porém, quando ele está polarizado inversamente, apresenta uma característica muito especial: consegue manter a tensão entre seus terminais a um valor preestabelecido, caso o valor original seja maior que o valor nominal do diodo. Por exemplo, usando um diodo Zener de 4,7 V conseguimos "transformar" qualquer tensão acima de 4,7 V em 4,7 V. Por exemplo, a aplicação de uma tensão de 9 V em cima desse diodo com um resistor instalado em série fará com que esta seja reduzida para 4,7 V. Essa "transformação" é também chamada *regulação de tensão*. Daí que a aplicação mais usual do diodo Zener é como um regulador de tensão.

Características

Diodos Zener são vendidos de acordo com dois parâmetros básicos, a sua tensão Zener (V_Z) e a sua potência máxima (P_d ou P_Z). A corrente máxima suportada (I_Z ou I_{Zm}) pode ser facilmente calculada através da fórmula:

$$I_Z = \frac{P_Z}{V_Z} \qquad (27.2)$$

As potências mais comuns para diodos Zener são 400 mW, 500 mW, 1 W, 1,3 W, 2 W e 5 W. Assim, um diodo Zener de 4,7 V de 400 mW consegue fornecer uma corrente máxima de 85 mA, por exemplo.

Você deve estar se perguntando qual é a mágica nesse tipo de componente, isto é, como um diodo consegue simplesmente reduzir uma tensão de uma maneira assim tão simples. Para onde

vai a diferença de tensão? Da mesma forma que ocorre nos resistores, os diodos Zener dissipam o excesso de tensão através de calor. É por esse motivo que os diodos Zener são classificados de acordo com a sua potência (P_Z).

O detalhe importante é que o diodo Zener só "funciona" (isto é, só funciona como um regulador de tensão) quando por ele passa uma corrente mínima, que chamaremos de I_{Zmin}. O problema é que os fabricantes não informam o valor desta corrente. Na prática, podemos considerá-la como sendo 10% da corrente máxima do diodo (I_Z). Por exemplo, para um diodo Zener de 500 mW e 6,8 V, a corrente máxima suportada (I_Z) é de 73,5 mA. Podemos considerar, então, que I_{Zmin} é 7,35 mA. Ou seja, se passar menos do que 7,35 mA por este diodo Zener quando ele estiver polarizado inversamente, ele não regulará a tensão aplicada entre seus terminais.

Por outro lado, os fabricantes informam a corrente usada em laboratório para medir os parâmetros do diodo, chamada corrente de teste ou I_{ZT}. Apesar de esta não ser a corrente mínima necessária para o diodo Zener funcionar, é o valor de corrente recomendado que esteja passando pelo diodo Zener para seu melhor funcionamento.

Aplicação

Na Figura 27.17 ilustramos uma aplicação típica do diodo Zener. Se o diodo Zener da ilustração for de 4,7 V e a tensão da entrada (V_i) for maior do que 4,7 V, a tensão da saída (V_o) será mantida em 4,7 V.

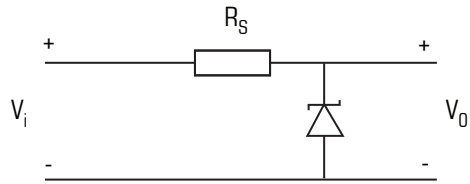


Figura 27.17: Diodo Zener, um regulador de tensão.

Circuitos reguladores de tensão são muito importantes e extremamente usados no dia a dia. Uma aplicação típica de um circuito deste tipo é em fontes de alimentação, onde é necessário que a tensão de saída da fonte seja mantida com um valor fixo.

Você deve ter percebido que colocamos um resistor em série no circuito da Figura 27.17. Esse resistor serve para não deixar corrente demais passar pelo diodo, o que ocasionaria a sua queima, nem tampouco deixar passar corrente de menos pelo diodo, o que faria com que ele não funcionasse (isto é, a corrente pelo diodo ser menor que I_{Zmin}).

Esse resistor, que chamaremos de R_S, possui um cálculo que varia um pouquinho de acordo com o tipo de circuito a ser montado. Você pode querer montar dois tipos de circuito: *regulador de tensão* ou *estabilizador de tensão*. No dia a dia você verá esses dois termos sendo usados como sinônimos, mas tecnicamente falando há uma diferença importante entre eles. A finalidade de ambos é manter fixa a tensão que será aplicada sobre um determinado circuito. No circuito regulador de tensão, a corrente que será consumida pela carga (chamada I_L) não é fixa, isto é, varia, e a tensão da entrada do circuito (V_i) é fixa. Já no circuito estabilizador de tensão, a corrente consumida pela carga é fixa e a tensão na entrada do circuito (V_i) varia.

Para calcular o valor de R_S, basta efetuar os cálculos apresentados a seguir. V_{imin} e $V_{imáx}$ são, respectivamente, o valor mínimo e o valor máximo na entrada do circuito. Por exemplo, se você pretende montar um circuito para estabilizar uma tensão que varia entre 10 V e 15 V, deverá usar V_{imin} como 10 V e $V_{imáx}$ como 15 V. No caso de circuitos onde não haja variação na entrada (por exemplo, a entrada é fixa em 9 V), use o mesmo valor para V_{imin} e $V_{imáx}$.

Para a corrente de carga, isto é, a corrente que será consumida pelo circuito que será ligado ao regulador ou estabilizador de tensão (I_L) o mesmo procedimento deve ser adotado. Se essa corrente variar, use nos cálculos o seu maior valor ($I_{Lmáx}$) e o seu menor valor (I_{Lmin}). Caso contrário, use o mesmo valor (fixo) tanto para $I_{Lmáx}$ quanto para I_{Lmin}.

$$R_{smáx} \leq \frac{V_{imin} - V_0}{I_{Lmáx} + I_{Zmin}} \quad (27.3)$$

$$R_{smin} \geq \frac{V_{imáx} - V_0}{I_{Zmáx} + I_{Lmin}} \quad (27.4)$$

O valor escolhido para R_S deverá ser um valor entre $R_{Smáx}$ e R_{Smin}. Ou seja:

$$R_{smáx} \geq R_s \geq R_{smin} \quad (27.5)$$

Se, ao efetuar os cálculos, o valor de R_{Smin} encontrado for maior do que o valor de $R_{Smáx}$ calculado, isso significa que o diodo Zener escolhido não serve para a aplicação dada. Nesse caso você deverá escolher um diodo Zener de potência maior.

Valores Comerciais

Assim como ocorre com resistores, diodos Zener são vendidos com valores comerciais preestabelecidos. Por exemplo, se você for a uma loja e pedir um diodo Zener de 5 V, o vendedor irá orientá-lo que o valor comercial mais próximo é de 5,1 V. É claro que fabricantes de equipamentos eletrônicos podem pedir a fabricantes de diodos um lote inteiro de um valor específico, não-comercial. Na Tabela 27.2 nós apresentamos os valores comerciais de diodos Zener. Valores acima de 22 V serão múltiplos de 10 dos valores apresentados. Por exemplo, 24 V, 27 V, 30 V, 33 V, e assim sucessivamente.

Tabela 27.2: Valores comerciais de diodos Zener.

2,4 V	4,3 V	7,5 V	13 V
2,7 V	4,7 V	8,2 V	15 V
3,0 V	5,1 V	9,1 V	16 V
3,3 V	5,6 V	10 V	18 V
3,6 V	6,2 V	11 V	20 V
3,9 V	6,8 V	12 V	22 V

Lendo Diodos Zener

Alguns diodos Zener possuem aspecto físico similar aos diodos de junção (corpo preto com uma listra branca indicando o catodo). Neste caso a única maneira de saber se o diodo é um Zener ou não é lendo o que está escrito no corpo do diodo e procurando o seu *data sheet* na Internet. Diodos Zener podem seguir a nomenclatura norte-americana, começando com "1N" tal como diodos de junção, ou então seguir a nomenclatura europeia, começando com "BZ". Existem diodos Zener que usam outras codificações, mas estas são as mais comuns.

Quando instalado em um circuito, você pode verificar na placa de circuito impresso, próximo ao diodo, qual é o nome que o projetista deu ao diodo dentro do circuito. Se houver um "Z" no nome (ex.: "DZ3"), trata-se de um diodo Zener, do contrário (ex.: "D3"), trata-se de um diodo de junção.

Na maioria das vezes, no entanto, diodos Zener possuem um corpo de vidro com algumas listras coloridas, que indicam a sua tensão. A listra mais grossa, além de indicar o catodo, é o primeiro número da tensão, seguindo o mesmo código de cores usado por resistores, capacitores e indutores. A segunda listra indica o segundo número da tensão. Outras listras, caso existam, indicam o nome (número) do diodo.

Por exemplo, um diodo Zener onde a listra mais grossa é lilás e a segunda listra é verde, é um modelo de 7,5 V (ver Tabela 23.1).

Testando Diodos Zener

Diodos Zener podem ser testados com um multímetro, conforme já explicado no tópico *Testando Diodos de Junção*. Adicionalmente você pode medir a tensão sobre o diodo Zener quando ele estiver instalado em um circuito, que deverá ser uma tensão nominal do diodo Zener. Caso o diodo Zener não esteja montado em um circuito e você queira testá-lo desta forma, basta montar o circuito da Figura 27.17.

Diodo Schottky

O diodo Schottky é um diodo que, em vez de usar uma junção PN típica, utiliza uma junção à base de metal. O mais importante desse tipo de diodo é a sua velocidade de comutação (tempo que o diodo demora para começar a conduzir imediatamente depois de ter sido diretamente polarizado, que no diodo Schottky é abaixo de 100 picossegundos – 10^{-10} s) e a baixa queda de tensão (V_F) existente sobre ele. Com isso, esse tipo de diodo é extremamente usado em aplicações de radiofrequência, onde é necessário o uso de diodos rápidos e com baixos níveis de capacitância e indutância para que não gerem interferência no circuito. Como a queda de tensão sobre os diodos Schottky é menor que a existente nos diodos de junção, esse tipo de diodo está sendo cada vez mais usado em circuitos de fontes de alimentação (na etapa de retificação), já que ele consome menos do que os diodos de junção e, com isso, torna a fonte de alimentação mais eficiente (faz com que a fonte de alimentação consuma menos).

Teoricamente diodos de junção podem ser simplesmente substituídos por diodos Schottky sem problemas em aplicações típicas como circuitos retificadores. Na prática, os diodos Schottky mais usuais oferecem um baixo limite de polarização inversa (ex.: 100 V ou menos) não podendo ser usados em circuitos de fontes de alimentação que operem com tensões muito altas a serem retificadas.

Diodos Schottky voltados para fontes de alimentação são oferecidos em um encapsulamento similar ao usado por transistores (na Figura 27.18 mostramos uma possibilidade; existem outros tipos de encapsulamento que podem ser usados e que são ligeiramente diferentes do apresentado na ilustração). Neste encapsulamento há dois diodos Schottky dentro, como mostramos no diagrama da Figura 27.18. Normalmente chamamos diodos Schottky oferecidos nesse formato de "retificador Schottky", muito embora tecnicamente diodo e retificador sejam sinônimos.

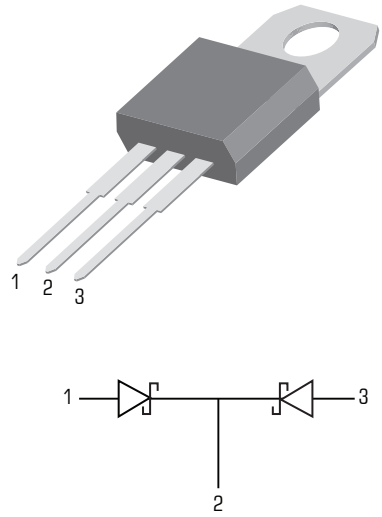


Figura 27.18: Retificador Schottky.

Nomenclatura

Retificadores Schottky possuem um sistema de nomenclatura razoavelmente padronizado, com as letras iniciais que tradicionalmente indicam o fabricante (embora fabricantes diferentes do original possam vender produtos usando exatamente a mesma nomenclatura sem problemas, assim como ocorre com transistores), seguidas de dois dígitos que indicam a corrente máxima suportada total (a corrente máxima suportada por cada diodo será a metade desta), e seguidas de dois dígitos que indicam a tensão máxima reversa suportada.

Por exemplo, o componente MBR2045 suporta uma corrente máxima de 20 A (10 A por diodo – ver o diagrama da Figura 27.18 para entender) e uma tensão máxima reversa de 45 V.

É importante notar que diodos de junção também podem ser fabricados com este tipo de encapsulamento, e você deverá verificar, através do *data sheet* do componente, se o retificador que você tem em mãos é um modelo Schottky ou um modelo "convencional". Em alguns casos esta informação está codificada na nomenclatura do retificador. Por exemplo, o retificador F1020 é um retificador convencional de 10 A (5 A · 2) por 20 V, enquanto que o modelo S1020 é um modelo Schottky com os mesmos limites (a letra "S" indica que se trata de um modelo Schottky). Mas note que nem sempre retificadores Schottky trarão a letra "S" em seu nome (como é o caso do retificador MBR2045 dado como exemplo).

Testando Diodos Schottky

Diodos Schottky podem ser testados com um multímetro, conforme já explicado no tópico *Testando Diodos de Junção*. No caso de retificadores com dois diodos dentro, você terá de testar os dois diodos individualmente, guiando-se pelo diagrama apresentado na Figura 27.18.

Diodo Tunnel

O diodo Tunnel é um tipo muito particular de diodo. Internamente ele é construído como uma junção PN típica, porém com excesso de impurezas. Para você ter uma ideia mais clara, em um diodo de junção típico existe aproximadamente um átomo de impureza para cada 10 milhões de átomos de silício ou germânio. Já no diodo Tunnel existem 1.000 átomos de impureza para cada 10 milhões de átomos de silício ou germânio. Esse excesso de portadoras (elétrons livres ou lacunas, dependendo se o material é do tipo P ou do tipo N) faz com que a barreira de potencial do diodo seja menor. Por causa dessa forma diferente de ser construído, a curva característica de um diodo Tunnel é totalmente diferente daquela de um diodo de junção. Existe uma região de resistência negativa, que vemos claramente na Figura 27.19.

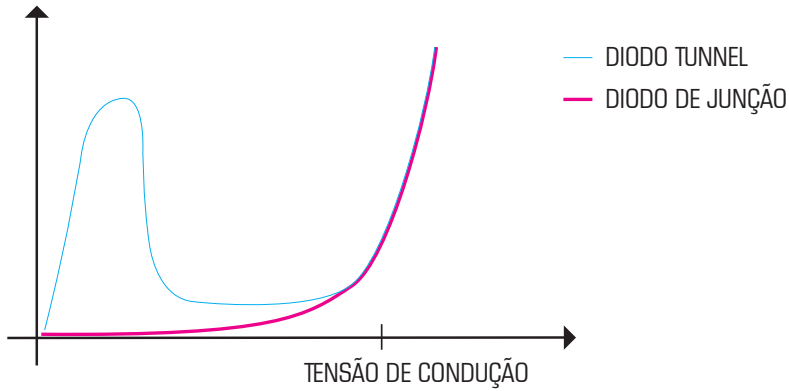


Figura 27.19: Curva característica típica de um diodo Tunnel comparada à de um diodo de junção.

Como você pode reparar pela curva do diodo, ele começa a conduzir a uma tensão muito mais baixa do que um diodo de junção, porém há uma região chamada vale, na qual, em vez de o diodo continuar conduzindo, ele começa a apresentar uma resistência, ou seja, ele vai deixando de conduzir, até atingir o fim do vale, onde o diodo Tunnel passa a operar como um diodo convencional.

Esse pico inicial é que é a grande vantagem do diodo Tunnel, pois sua rápida comutação e tensão de condução permite que ele seja utilizado em circuitos de radiofrequência operando a frequências muito altas (até 10 GHz), onde diodos de junção normalmente não podem ser usados por serem lentos demais para a aplicação desejada.

Diodo PNPN (Pinpin)

O diodo PNPN (também chamado pinpin ou simplesmente pin) é como se fosse dois diodos colados em série, daí o seu nome PNPN. Essa construção interna diferente faz com que a sua curva característica seja diferente daquela do diodo de junção convencional, como podemos ver na Figura 27.20.

Quando o diodo PNPN está polarizado diretamente, a corrente que passa pelo diodo vai crescendo lentamente, até que a tensão aplicada sobre seus terminais atinja um determinado valor preestabelecido (V_{BO}, mais conhecida como tensão de disparo). Quando a tensão entre os terminais atinge esse valor, a corrente que passa pelo diodo começa a crescer rapidamente. Dessa forma, um diodo PNPN é, na verdade, uma chave que está desligada quando a tensão aplicada sobre o diodo é menor que V_{BO} e ligada quando esta tensão é maior que V_{BO}.

Essa característica, no entanto, só existe quando o diodo PNPN está polarizado diretamente. Quando ele está inversamente polarizado, ele funciona como um diodo convencional.

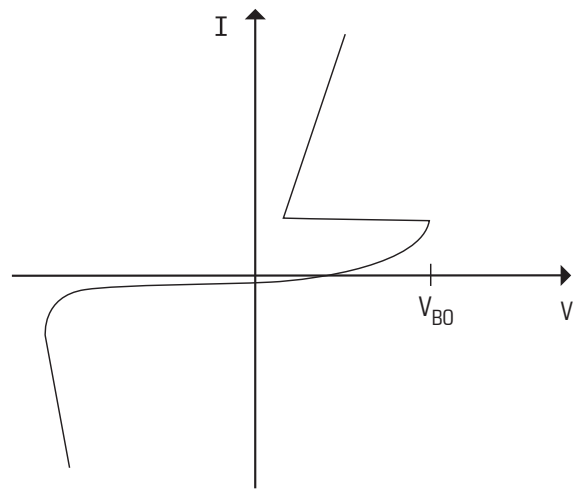


Figura 27.20: Curva característica do diodo PNPN.

DIAC

O DIAC (DIode for Alternating Current, Diodo para Corrente Alternada) é um diodo PNPN bidirecional. Enquanto o diodo PNPN só funciona como uma chave quando está diretamente polarizado, o DIAC opera nos dois sentidos, como se fossem dois diodos PNPN instalados em paralelo, um invertido em relação ao outro. Assim, o DIAC deixa passar corrente quando a tensão entre seus terminais atinge V_{BO}. Ou seja, assim como o diodo PNPN, o DIAC é uma chave que está desligada quando a tensão entre seus terminais é menor que V_{BO} e ligada quando a tensão entre seus terminais é maior que V_{BO}.

Diodo Varicap

O diodo Varicap, também chamado diodo de sintonia ou Varactor, é um diodo que varia sua capacitância em função da tensão aplicada em seus terminais. Em circuitos em que ele é usado, ele é instalado polarizado inversamente, assim como ocorre com diodos Zener.

Como a barreira de potencial do diodo varia de acordo com a tensão aplicada, é possível alterar a capacitância entre os terminais do diodo de acordo com a tensão aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, menor é a capacitância apresentada nos terminais do componente.

Este tipo de diodo é normalmente usado em circuitos de sintonia de rádio e TV, onde o varicap substitui o capacitor variável normalmente utilizado para fazer o ajuste de sintonia.

◆◆◆

Exercícios

1. Projete um circuito estabilizador de tensão usando um diodo Zener 1N750A (V_Z = 4,7 V, I_{ZM} = 85 mA), onde a tensão de entrada varia entre 6 V e 7 V e a corrente consumida pela carga é de 25 mA.
2. Projete um circuito regulador de tensão usando um diodo Zener 1N5236B (V_Z = 7,5 V, P_Z = 500 mW), onde a tensão da entrada é de 12 V e a corrente consumida pela carga varia entre 25 mA e 50 mA.
3. Qual o valor do resistor que deve ser colocado em série com um LED com corrente de teste de 10 mA a ser ligado a uma fonte de alimentação de 12 V, supondo que o LED tenha uma queda de tensão (V_F) de 3 V?

Capítulo 28
Tiristores

Introdução

Tiristores são um tipo especial de retificador que possuem um terminal adicional chamado *gate* (portão) que é usado para "ligar" ou "desligar" o componente. Ou seja, a passagem de corrente elétrica pelo componente será permitida dependendo se há corrente elétrica aplicada sobre o gate. Desta forma, tiristores funcionam como se fossem chaves eletrônicas.

Existem dois tipos de tiristores no mercado, o SCR (Silicion Controlled Rectifier, Retificador Controlado de Silício) e o TRIAC.

Fisicamente falando, esses componentes são encontrados com diversos tipos de encapsulamento, que são os mesmos usados por transistores, circuitos integrados reguladores de tensão e retificadores Schottky e outros componentes. Por isso, apenas observando o formato do componente não há como dizer o tipo de componente que ele é; você deverá fazer uma pesquisa na Internet pelo nome decalcado sobre o componente para identificá-lo. Na Figura 28.1 nós mostramos os tipos de encapsulamento mais comuns usados por tiristores (existem outros, mostramos apenas os mais comuns). Os nomes indicados são os nomes dos encapsulamentos.

O DIAC é um componente que funciona de maneira similar ao TRIAC, porém em vez de ser ativado através de um terminal próprio, é ativado quando a tensão entre seus terminais supera um determinado valor. Nós abordamos o funcionamento do DIAC no capítulo passado.

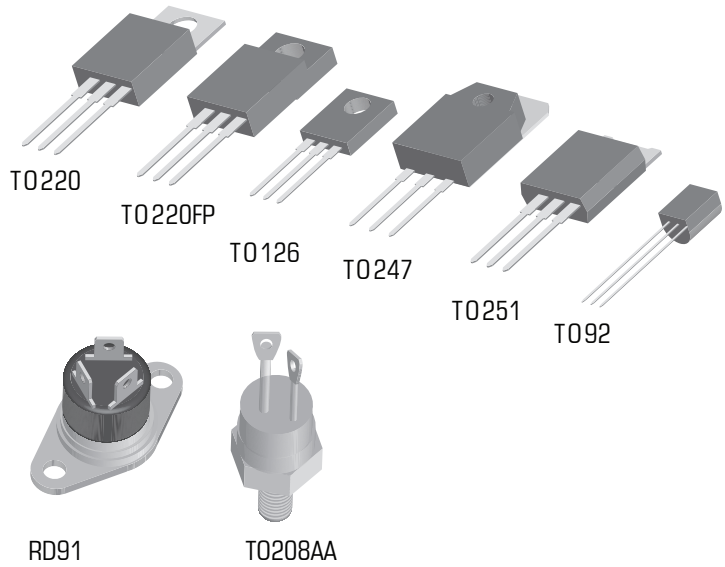


Figura 28.1: Tiristores.

Figura 28.2: Simbologia.

SCR (Silicon Controlled Rectifier)

O SCR, retificador controlado de silício, é um diodo PNPN com um terminal a mais, chamado *gate* (portão). O SCR é uma chave eletrônica, que funciona quando aplicamos uma pequena cor-

rente em seu gate. Quando não há corrente aplicada no gate, o SCR não dispara, funcionando como uma chave aberta. Podemos encarar o SCR como sendo um relé eletrônico, com a vantagem de não usar nenhum componente mecânico para fechar contato. Dessa forma, a diferença do SCR para um diodo PNPN é que, no diodo PNPN, o disparo ocorre quando entre os terminais do diodo é aplicada uma tensão igual ou maior que a tensão de disparo do diodo. No caso do SCR esse disparo é controlado por um terminal à parte, chamado gate.

Na Figura 28.3 nós vemos a estrutura interna do SCR.

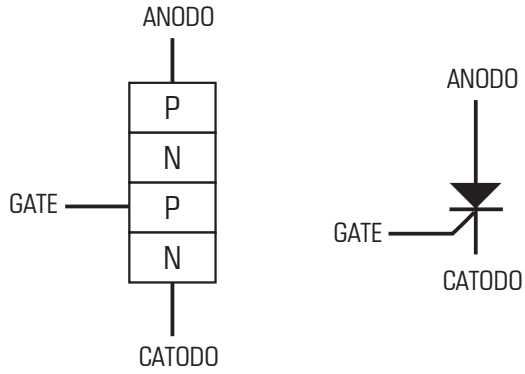


Figura 28.3: Estrutura interna do SCR.

Características

Assim como ocorre com outros componentes, as características de um SRC específico podem ser vistas em seu *data sheet*. Os parâmetros mais importantes a serem sabidos para o projeto de circuitos são:

- Corrente máxima RMS, $I_{T(RMS)}$
- Corrente máxima média, $I_{T(AV)}$
- Tensão máxima de bloqueio direta (V_{DRM}) e reversa (V_{RRM})
- Corrente máxima suportada pelo gate, I_{GM}
- Tensão máxima suportada pelo gate, V_{GM}
- Corrente de ativação do gate, I_{GT}

- Tensão de ativação do gate (medida entre o gate e o catodo), V_{GT}
- Corrente mínima de condução, holding current, I_H
- Queda de tensão máxima quando ligado, V_{TM}

Assim como ocorre com diodos, se você superar esses parâmetros, o componente se queimará.

Funcionamento

Quando uma tensão e uma corrente com valores similares a V_{GT} e a I_{GT} são aplicadas no gate do SCR, ele "dispara", fazendo com que o SCR funcione como se fosse um diodo de junção, deixando passar corrente em um sentido e bloqueando corrente no sentido inverso.

O SCR continuará "disparado" mesmo se você remover o sinal aplicado em seu gate que o fez disparar. Para o SCR "desligar", é necessário que a corrente passando entre o catodo e o anodo seja menor do que a corrente mínima de condução do dispositivo (I_H). Em geral o valor dessa corrente é muito baixo, menor do que 100 mA.

Para circuitos de corrente contínua isso pode parecer meio estranho, já que, como a corrente do circuito provavelmente permanecerá sempre a mesma, ela nunca cairá abaixo do valor de I_H. Em outras palavras, em circuitos de corrente contínua provavelmente uma vez ativado, o SCR permanecerá ativado "para sempre".

No caso de o SCR estar ligado a uma carga alimentada por tensão alternada, a história passa a fazer mais sentido. Como a tensão (e, consequentemente, a corrente) é alternada, ela vai a zero várias vezes por segundo (120 vezes no caso da rede elétrica de 60 Hz, como estudamos no Capítulo 5), desativando o SCR.

Aplicação

São inúmeras as aplicações que podemos dar a um SCR, da mesma forma que são inúmeras as aplicações que podemos dar a um relé. Ele é muito usado em circuitos nos quais pretendemos controlar um dispositivo de tensão mais alta do que a utilizada no circuito. Por exemplo, para ligar ou desligar lâmpadas, motores e circuitos CA de uma forma geral através de uma pequena corrente CC (por exemplo, ligar e desligar uma lâmpada de 127 V a partir de circuito de corrente contínua cuja tensão máxima seja de apenas 6 V). A Figura 28.4 ilustra como isso poderia ser feito.

Neste circuito, basta deixarmos de aplicar uma corrente no gate do SCR para que ele desligue a lâmpada, pois em questão de milissegundos a própria tensão alternada da rede irá cair em zero volt, fazendo com que a corrente que passa pelo SCR seja zero (logo, abaixo da corrente mínima de condução), fazendo com que o SCR seja "desligado". Para manter a lâmpada liga-

da, bastará manter uma corrente no gate, pois o SCR não será desligado, uma vez que o gate estará ativado.

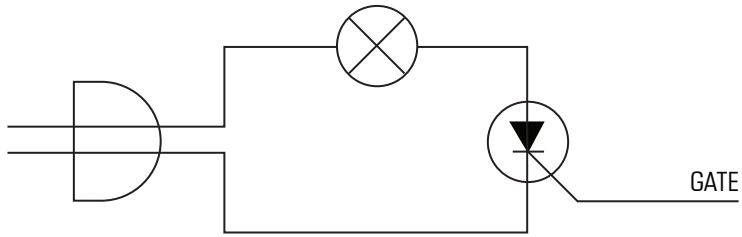


Figura 28.4: Usando um SCR para ligar e desligar uma lâmpada CA a partir de um circuito CC.

Vimos que o SCR quando está conduzindo funciona como se fosse um diodo de junção. Para o exemplo da Figura 28.4, portanto, há uma questão a ser levada em conta: enquanto houver corrente no gate, a tensão que estará sendo aplicada sobre a lâmpada será somente o semiciclo positivo da tensão da rede (pois a tensão alternada da rede elétrica será retificada, já que o SCR é um diodo), fazendo com que o brilho da lâmpada corresponda a somente 50% de seu brilho máximo, mesmo estando o gate ativado o tempo todo.

Embora isso possa parecer um inconveniente a uma primeira vista, esse efeito muitas vezes é desejado, dependendo da aplicação. Se o fato de o SCR não conduzir no semiciclo negativo for um inconveniente, há duas soluções: o uso de dois SCRs, um "de costas" para o outro (os gates interligados e o catodo de um ligado ao anodo de outro e vice-versa), ou então o uso de um TRIAC, que é como se fosse um SCR sem polaridade.

TRIAC

O TRIAC (TRIode for Alternating Current ou Triodo para Corrente Alternada) é como se fosse um SCR sem polaridade, como se dois SCRs estivessem ligados um "de costas" para o outro (os gates interligados e o catodo de um ligado ao anodo de outro e vice-versa). Como o TRIAC não possui polaridade, não existem os conceitos de "inversamente polarizado" e "diretamente polarizado" comuns aos diodos e, em particular, aos SCRs. Assim, quando o TRIAC é disparado, ele conduz tanto o semiciclo positivo quanto o semiciclo negativo de tensões aplicadas sobre ele. De resto, o funcionamento deste componente é similar ao de um SCR. Na Figura 28.5 nós vemos a estrutura interna de um TRIAC e o seu símbolo.

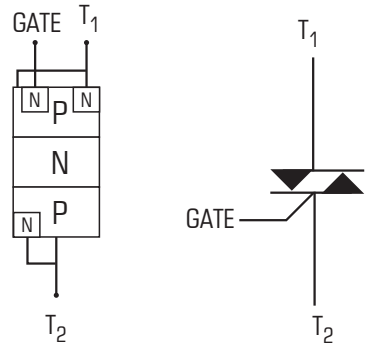


Figura 28.5: Estrutura interna e simbologia do TRIAC.

Fisicamente falando, um TRIAC é idêntico a um SCR. As características básicas do TRIAC são as mesmas do SCR.

Aplicação

A aplicação do TRIAC é exatamente a mesma do SCR: uma chave eletrônica. A grande vantagem do TRIAC sobre o SCR é que ele não retifica a corrente/tensão aplicada em seus terminais.

Usos clássicos de TRIACs incluem circuitos de controle de luminosidade de lâmpadas (*dimmers*) e controle de velocidade de rotação de motores, em particular no controle de velocidade de rotação de ventiladores de teto.

A pronúncia correta de dimmer é "dímer" e não "dáimer".

Em circuitos alimentados por tensão alternada, especialmente lâmpadas e motores, podemos fazer com que a tensão da rede não seja toda aplicada, isto é, podemos usar um TRIAC para "picotar" essa tensão, através de um circuito oscilador aplicado ao gate do componente. Essa técnica é conhecida como modulação por largura de pulso (PWM) e nós já a havíamos estudado no Capítulo 5.

Para que você entenda isso melhor, observe a Figura 28.6. Essa figura mostra a forma de onda da rede elétrica e a forma de onda na saída do TRIAC, criada através de um dimmer. No gate do TRIAC aplicamos uma corrente somente de tempos em tempos (com duração de t1 indicado no

gráfico). Com isso, o TRIAC só conduzirá de tempos em tempos. Através de um potenciômetro nós alteramos a duração de t1, fazendo com que a tensão da rede seja aplicada por mais ou por menos tempo sobre o dispositivo sendo controlado.

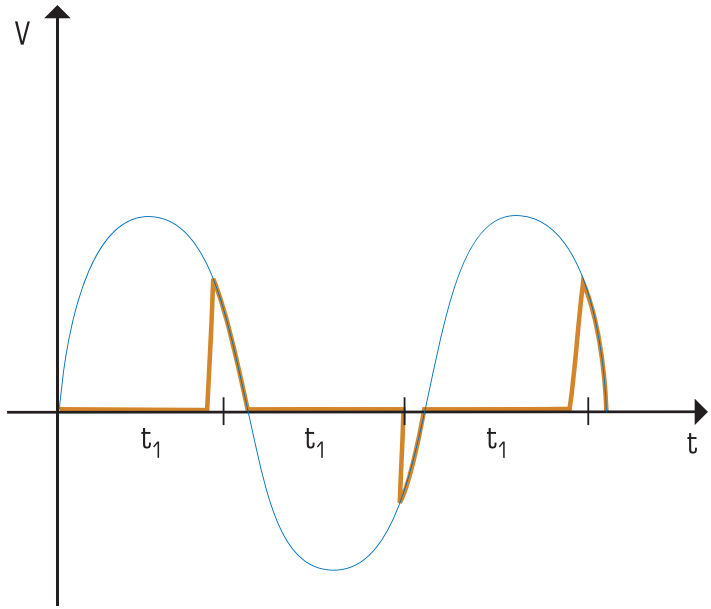


Figura 28.6: Usando um TRIAC como dimmer.

Você pode estar se perguntando se a lâmpada (ou motor) não ficará "piscando" em vez de acender, já que a forma de onda original será "picotada". Isso não ocorrerá da mesma forma que a lâmpada não pisca quando a ligamos na tomada, e a tensão da rede elétrica varia inúmeras vezes por segundo.

É possível usar um SCR para o controle de brilho de lâmpadas e velocidade de motores. Porém, como o SCR não conduz durante o semiciclo negativo da tensão alternada da rede elétrica, não é possível aplicar toda a tensão possível sobre a carga. Em outras palavras, com um SCR só é possível colocar a lâmpada para brilhar a 50% de seu brilho máximo e motores para girarem a 50% de suas velocidades máximas.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a diferença entre um SCR e um TRIAC?
2. Qual é a diferença entre um DIAC e um TRIAC?

Capítulo 29
Transistores

Introdução

Os transistores sem dúvida alguma são os componentes mais famosos do mundo da eletrônica. De fato, a invenção e o uso de transistores transformou radicalmente o mundo no século XX. Vários aparelhos que antes eram gigantescos, pesados e consumiam horrores, por utilizarem antigos componentes chamados válvulas – tais como aparelhos de TV e rádios – passaram a ser bem menores, leves, consumir menos, e o melhor de tudo: ser mais baratos. Outros equipamentos eletrônicos, antes sequer impensáveis, passaram a ser criados com o uso de transistores.

Hoje não há equipamento eletrônico que não use transistores. Mesmo aqueles que utilizam somente circuitos integrados indiretamente utilizam transistores, já que circuitos integrados são, na verdade, vários transistores integrados em um único componente.

O modelo matemático teórico para o estudo do transistor é extremamente rico e complexo. Há vários livros no mercado, muito maiores do que este, explicando somente o funcionamento e as aplicações dos transistores. Como a proposta deste livro é não apresentarmos contas complexas nem tampouco perdermos tempo explicando detalhes aprofundados demais, tentaremos ser sucintos na apresentação desse componente, lembrando, portanto, que nossa explicação estará longe de ser completa. Se você tiver curiosidade para aprender mais aprofundadamente sobre transistores, recomendamos a leitura de livros que tratam especificamente sobre esse componente.

Encapsulamento

Transistores podem ser encontrados em uma variedade incrível de encapsulamentos, ou seja, o aspecto físico de um transistor varia bastante. Nas Figuras 29.1 e 29.2 nós apresentamos os encapsulamentos mais comuns e seus nomes, mas note que há vários outros tipos de encapsulamento possíveis e que não estamos ilustrando. Esses mesmos encapsulamentos podem ser usados por outros tipos de componentes, tais como tiristores, circuitos integrados reguladores de tensão e retificadores Schottky. Desta forma, apenas observando o encapsulamento não há como identificar qual é o tipo de componente: é necessário ler o que há escrito e procurar pelo seu *data sheet*. Como já explicamos em capítulos anteriores, componentes SMD (Surface Mount Devices, dispositivos de montagem em superfície) são soldados à placa de circuito impresso usando ferramentas robóticas.

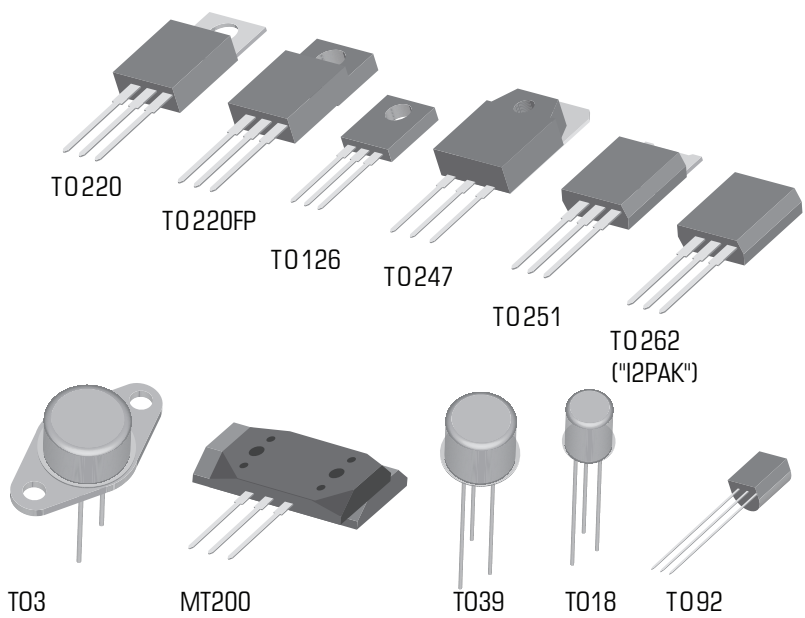


Figura 29.1: Transistores.

O tamanho físico do transistor varia basicamente com a quantidade de calor que se pretende dissipar. Assim, transistores com um tamanho físico maior são capazes de dissipar mais calor

do que transistores fisicamente menores. Inclusive é interessante notar que, em alguns casos, um mesmo modelo de transistor pode ser encontrado em diferentes tipos de encapsulamento, dependendo da aplicação que será dada. Consequentemente, o tamanho físico do transistor nos dá uma ideia se ele é um transistor de baixa potência (ex.: TO92), média potência (ex.: TO126) ou alta potência (ex.: TO3 e TO247).

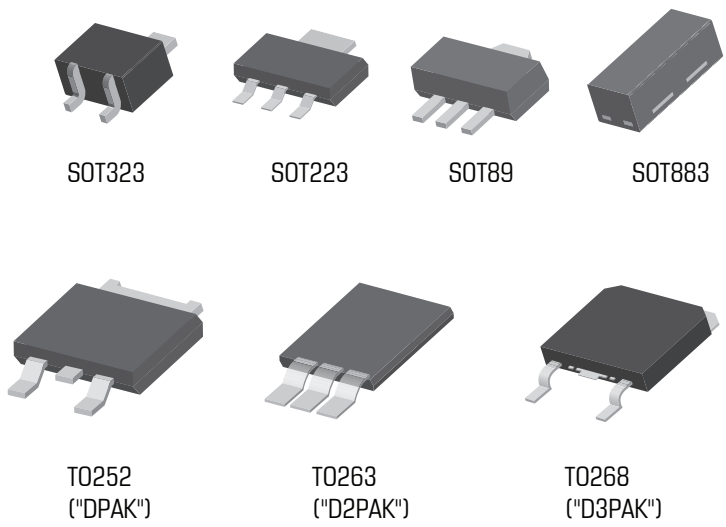


Figura 29.2: Transistores SMD.

Importante notar que o tipo de encapsulamento independe do tipo do transistor. Por exemplo, você pode encontrar tanto transistores bipolares quanto transistores de efeito de campo usando o encapsulamento TO220 (nós abordaremos os diversos tipos de transistor existentes ao longo deste capítulo, portanto não se preocupe). Desta forma, não é possível determinar o tipo de transistor apenas olhando para ele.

Além disso, apesar de os tipos de encapsulamento serem padronizados, eles não informam a disposição dos terminais do transistor. Por exemplo, tanto o transistor BC237 quanto o BC547 utilizam o encapsulamento TO92, porém a disposição dos terminais (isto é, qual dos três terminais é a base, qual é o emissor e qual é o coletor) é diferente entre esses dois transistores. Portanto, você terá de consultar o *data sheet* do transistor para saber a disposição de seus terminais.

Como já explicado no Capítulo 27, data sheets de componentes são facilmente encontrados na Internet; experimente entrar o nome do transistor no Google para achar um data sheet.

No caso de transistores com encapsulamento totalmente metálico (ex.: TO3), em geral o transistor possui dois terminais. O terceiro terminal (normalmente o coletor) está conectado diretamente à carcaça do transistor. No caso de transistores onde o terminal do meio foi "cortado" (ex.: TO252 e TO268), o dissipador de calor anexado ao transistor funciona como sendo o terminal "cortado".

Simbologia

Na Figura 29.3 você confere a simbologia dos diversos tipos de transistores existentes. O círculo ao redor do transistor é opcional.

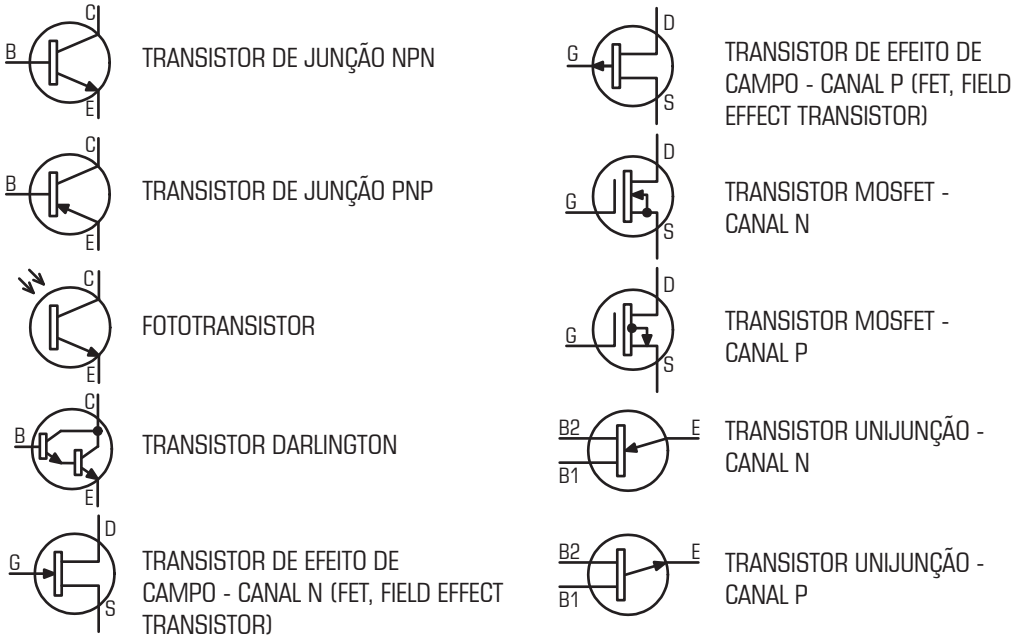


Figura 29.3: Simbologia.

Nomenclatura

Assim como ocorre com os diodos, os transistores são classificados de acordo com um código. Através desse código podemos procurar pelo *data sheet* do componente e verificar o seu tipo (bipolar, efeito de campo, Darlington etc.), as suas características (correntes máximas, tensões máximas etc.) e a disposição de seus terminais. Simplesmente através do código do transistor (por exemplo, BC547, TIP41, 2N3055, etc) não temos como saber essas informações.

A nomenclatura de um transistor está, obviamente, escrita sobre o seu corpo. Normalmente há duas ou mais linhas contendo letras e números. Normalmente o modelo do transistor está na primeira linha, e os demais números e letras indicam informações complementares tais como número do lote de fabricação, código da fábrica que produziu o componente e data de fabricação. Você deverá utilizar, portanto, os dados presentes na primeira linha, somente.

Em alguns casos o fabricante pode remover o início do nome e deixar apenas o meio do nome. O caso mais comum é a remoção da marcação "2S" em componentes das séries 2SA, 2SB, 2SC, 2SD, 2SJ, 2SK etc. Por exemplo, um transistor com a marcação "D1555" indica que este é um transistor 2SD1555, sendo este o modelo que você deve procurar no Google para achar o seu *data sheet*. Uma exceção são os transistores com marcação iniciada com "K", pois às vezes em vez de serem transistores da série 2SK são transistores da série TK.

Outra marcação normalmente existente é o fabricante do transistor (alguns exemplos: Toshiba, Fairchild, Infineon, ST, Philips etc.). Em alguns casos o nome do fabricante vai estar escrito, mas na maioria das vezes haverá apenas a logomarca do fabricante, e você terá de conhecer a logomarca para saber qual é o fabricante.

Em http://how-to.wikia.com/wiki/Howto_identify_integrated_circuit_(chip)_manufacturers_by_their_logos há um extenso banco de dados contendo a logomarca da maioria dos fabricantes de dispositivos semicondutores.

Sabendo o fabricante, você pode ir diretamente ao site dele e fazer a busca por informações sobre o componente. Em vários casos onde a nomenclatura do componente está incompleta em seu corpo, você só conseguirá saber qual é o nome "completo" do componente navegando no site do seu fabricante. Você precisará saber o nome "completo" do transistor para poder baixar o *data sheet* correto e também para poder comprar o componente exato, no caso de substituição de um transistor defeituoso (você pode sempre substituir um transistor por outro com mesmas características, pinagem, encapsulamento, mas para isso você precisará ter acesso ao *data sheet* do componente de qualquer forma, para saber essas informações).

Alguns exemplos reais. Considere um transistor com a marcação "P14NK50ZFP". Esta é uma nomenclatura incompleta. Mas como abaixo desse número havia a logomarca do fabricante ST, sabemos que o nome completo desse componente é STP14NK50ZFP, pois esse fabricante sempre omite as letras "ST" do início da nomenclatura de seus componentes. Considere um transistor com a marcação "20N60C3". Esta é uma nomenclatura incompleta. Mas como há a logomarca do fabricante Infineon, fizemos uma busca no site deste fabricante e descobrimos que este transistor na verdade chama-se SPP20N60C3.

No caso de um mesmo transistor estar disponível em mais de um tipo de encapsulamento, a sua nomenclatura também pode indicar o seu encapsulamento. Os dois exemplos acima são perfeitos para ilustrar esta questão. O transistor "14NK50" é chamado STP14NK50Z quando utiliza o encapsulamento TO220; STP14NK50ZFP quando utiliza o encapsulamento TO220FP; STB14NK50ZT4 quando utiliza o encapsulamento TO263 ("D2PAK"); STB14NK50Z-1 quando utiliza o encapsulamento TO262 ("I2PAK") e STW14NK50Z quando utiliza o encapsulamento TO247. Todos esses transistores são internamente idênticos, possuindo exatamente as mesmas características. A única diferença entre eles é o encapsulamento.

Para o caso do transistor "20N60C3", ele é chamado SPP20N60C3 quando utiliza o encapsulamento TO220; SPI20N60C3 quando utiliza o encapsulamento TO262 ("I2PAK"); SPA20N60C3 quando utiliza o encapsulamento TO220FP e SPW20N60C3 quando utiliza o encapsulamento TO247. Da mesma forma que o exemplo anterior, todos esses transistores são internamente idênticos; a única diferença entre eles é o encapsulamento.

Como você pode observar, há uma tendência recente dos fabricantes de usarem a letra "P" para indicar o encapsulamento TO220 e "W" para indicar o encapsulamento TO247. Veja que falamos "tendência" e não "padrão". Infelizmente há muitos fabricantes no mercado e nem todos seguem o mesmo padrão de numeração, muito embora essa situação tenha melhorado muito nos últimos anos.

No caso de transistores SMD de tamanho muito reduzido (encapsulamentos SOT323, SOT223 e SOT89, por exemplo), às vezes não há espaço nem mesmo para decalcar o nome do transistor, de tão pequeno o componente é. Neste caso, o fabricante colocará apenas um código formado por poucas letras e números. Neste caso, você deverá pesquisar na Internet, e o decodificador existente em http://www.marsport.org.uk/smd é um ponto de partida.

Transistores Bipolares (BJT)

O transistor "clássico" é chamado transistor de junção bipolar, transistor de junção, transistor bipolar ou BJT (Bipolar Junction Transistor). Quando não mencionamos qual é o "tipo" do transistor, assume-se que estamos falando de transistores bipolares. Existem outros tipos de

transistor, como o transistor de efeito de campo (FET) e o transistor Darlington, que também estaremos abordando neste capítulo.

Estrutura

Os transistores bipolares são construídos com três pedaços de material semicondutor, ligados através de duas junções PN (ver tópico *Funcionamento de Dispositivos Semicondutores* do Capítulo 27). Com isso, dois tipos de transistores podem ser construídos: NPN e PNP. Esses nomes refletem a ordem em que os pedaços de material semicondutor foram ligados internamente. Como você pode reparar, transistores NPN possuem mais material do tipo N, enquanto transistores PNP possuem mais material do tipo P. Na Figura 29.4 vemos a estrutura interna dos transistores NPN e PNP. Repare que transistores bipolares possuem três terminais, chamados emissor, coletor e base.

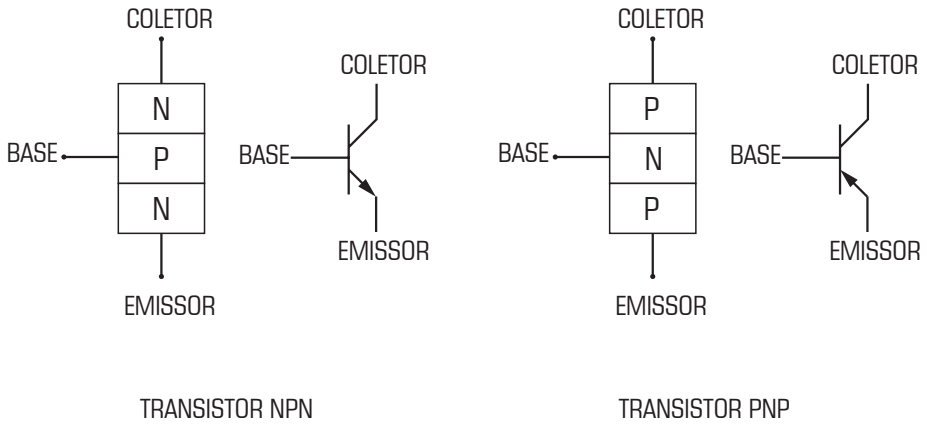


Figura 29.4: Estrutura interna e simbologia dos transistores de junção bipolar (BJT).

Configurações

Independentemente de sua aplicação, transistores bipolares só podem ser ligados de três maneiras possíveis, o que facilita enormemente o estudo deste componente. Essas três maneiras são baseadas em qual dos terminais do transistor será ligado ao terra do circuito (polo negativo da fonte de alimentação). Assim, essas três configurações são chamadas emissor comum, coletor comum e base comum, dependendo do terminal que é ligado ao terra, e são apresentadas na Figura 29.5.

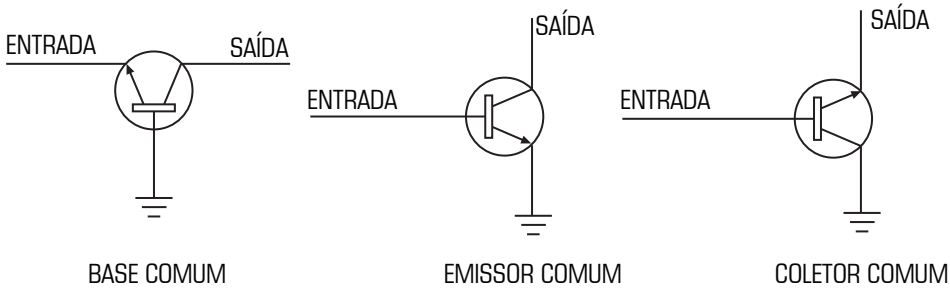


Figura 29.5: As três maneiras possíveis de se montar um circuito com um transistor.

Cada configuração tem suas próprias características, que resumimos na Tabela 29.1.

Tabela 29.1: Comparativo entre as configurações possíveis de um transistor bipolar.

Característica	Base Comum	Emissor Comum	Coletor Comum
Inversão de Fase	Não	180º	Não
Ganho de Tensão	Alto	Médio	Baixo
Ganho de Corrente	Baixo (α)	Médio (β)	Alto (γ)
Ganho de Potência	Baixo	Alto	Médio
Impedância de Entrada	Baixa	Média	Alta
Impedância de Saída	Alta	Média	Baixa

O ganho de corrente é chamado α, β ou γ (alfa, beta ou gama, respectivamente), dependendo da configuração do transistor. Essa característica é muito importante sabermos, pois indica justamente o quanto um determinado transistor é capaz de amplificar uma corrente aplicada em sua entrada.

O cálculo do ganho de corrente é extremamente simples e resumimos a seguir:

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad (29.1) \qquad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (29.2) \qquad \gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} \quad (29.3)$$

Lembramos que Δ (delta) significa "variação", sendo a diferença entre os valores máximo e mínimo. A relação entre α, β e γ pode ser facilmente deduzida, mas já resumimos para você a seguir na próxima página.

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (29.4) \qquad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (29.5) \qquad \gamma = \beta + 1 \quad (29.6)$$

A configuração de emissor comum é a mais usada para circuitos amplificadores, como veremos. O ganho de corrente para essa configuração (β) é também conhecido como h_{FE}. Ou seja, β e h_{FE} são sinônimos, ambos significando ganho de corrente.

Características

No *data sheet* de um transistor bipolar você encontrará as suas mais diversas características. A não ser que seja mencionada uma temperatura diferente, todas as características divulgadas pelo fabricante foram medidas a 25º C. Como estudamos no Capítulo 27, componentes semicondutores possuem uma característica chamada *de-rating*, onde eles perdem a capacidade de entregar corrente conforme suas temperaturas aumentam. As características de transistores bipolares são normalmente dadas assumindo que o transistor está conectado na configuração emissor comum, que é a mais comum.

As características mais importantes a serem sabidas são:

- **Corrente máxima de coletor (I_C):** É a corrente máxima suportada pelo transistor, de forma contínua.
- **Corrente máxima de pico do coletor (I_{CM}):** É a corrente máxima de pico suportada pelo transistor.
- **Tensão máxima suportada entre o coletor e a base (V_{CBO}):** O nome já diz tudo, esta medição é feita com o emissor removido do circuito.
- **Tensão máxima suportada entre o coletor e o emissor (V_{CEO}):** O nome já diz tudo, esta medição é feita com a base removida do circuito.
- **Tensão máxima suportada entre o emissor e a base (V_{EBO}):** O nome já diz tudo, esta medição é feita com o coletor removido do circuito.
- **Corrente de corte do coletor (I_{CBO}):** Indica a corrente mínima que deverá ser aplicada no coletor para que o transistor funcione (no tópico *Aplicações* exploraremos esse assunto).
- **Corrente de corte do emissor (I_{EBO}):** Indica a corrente mínima que deverá ser aplicada no emissor para que o transistor funcione (no tópico *Aplicações* exploraremos esse assunto).

- **Tensão de saturação coletor/emissor (V_{CEsat}):** Indica a tensão presente entre o coletor e o emissor do transistor quando este está em saturação (no tópico *Aplicações* exploraremos esse assunto).
- **Tensão de saturação base/emissor (V_{BEsat}):** Indica a tensão presente entre a base e o emissor do transistor quando este está em saturação (no tópico *Aplicações* exploraremos esse assunto).
- **Queda de tensão entre a base e o emissor (V_{BE}):** A queda de tensão entre a base e o emissor é de normalmente 0,6 V ou 0,7 V, e é o valor que normalmente usamos quando estamos efetuando cálculos para uso do transistor como amplificador. Este parâmetro indica o valor exato desta tensão, medido pelo fabricante.
- **Ganho de corrente do transistor (h_{FE}):** Assunto explorado no tópico anterior.
- **Potência máxima dissipada (P_{tot}):** Indica a potência máxima que o transistor dissipará, em watts. Este valor é importante ser conhecido para o correto dimensionamento do dissipador de calor que deverá ser usado, caso o transistor necessite de um (o dissipador usado deverá ser capaz de dissipar pelo menos essa quantidade de potência).

Existem diversos outros parâmetros, mas esses são os mais importantes. Obviamente eles variam de acordo com o modelo do transistor. Na hora de projetarmos um circuito, devemos escolher um transistor compatível com os parâmetros que queremos. Na hora de substituir um transistor defeituoso, caso você não encontre o transistor defeituoso à venda, poderá substituí-lo por outro que tenha parâmetros similares e mesmo padrão de pinagem (isto é, a base, o emissor e o coletor na mesma posição).

Além dessas características numéricas, o *data sheet* de um transistor normalmente traz uma série de gráficos mostrando o comportamento dos parâmetros do transistor. Esses gráficos podem facilitar o projeto de circuitos, como explicaremos mais adiante.

É ainda importante saber que todos os componentes eletrônicos possuem duas séries, civil e militar. A série civil é a que você compra em lojas de componentes eletrônicos e é a que é encontrada dentro de equipamentos eletrônicos "comuns". Componentes de série militar são mais caros, porém possuem tolerância mais apertada e podem operar em uma maior faixa de temperatura ambiente, sendo o tipo de componente usado em equipamentos militares ou mesmo em equipamentos civis onde essas características são importantes (por exemplo, equipamentos hospitalares).

Aplicações

É simplesmente infinita a quantidade de circuitos diferentes que podemos construir com transistores. As aplicações mais comuns, no entanto, são baseadas em duas aplicações básicas que um transistor possui: como amplificador e como chave.

Transistor Como Amplificador

O transistor é, em sua essência, um amplificador. Ele consegue aumentar a corrente e/ou tensão de um sinal aplicado sobre ele. Basta pensar em um amplificador de áudio, que é o exemplo mais fácil de você entender um circuito amplificador. Neste circuito, na entrada do transistor colocamos um sinal de áudio de baixa amplitude, e na saída obtemos o mesmo sinal com uma amplitude muito maior. Com isso, o circuito terá uma entrada e uma saída.

Na Figura 29.5 deixamos propositadamente de representar a alimentação do circuito. Em um amplificador, é através da alimentação CC do transistor – também chamada *polarização* ou *bias*, em inglês – que ele é capaz de fazer a "mágica" da amplificação. Obviamente, se o transistor não fosse alimentado por uma fonte de alimentação, ele não teria como funcionar, isto é, amplificar o sinal. Na realidade, o transistor usa a tensão da fonte para aumentar a tensão dada para ele amplificar. Os ganhos de tensão obtidos com um amplificador podem ser assustadoramente grandes, mas são limitados à polarização do transistor.

Por exemplo, suponha que um determinado circuito amplificador possua um ganho de tensão de 30 (característica chamada A_V). Isso significa que o circuito é capaz de colocar em sua saída um sinal 30 vezes maior do que o sinal que foi aplicado em sua entrada. Se for aplicado um sinal com uma tensão de pico-a-pico (Vpp) de 100 mV, na saída teremos um sinal de pico-a-pico de 3 V. Simples assim. Porém, se você aplicar um sinal de 1 V na entrada desse circuito, pode ser que não obtenha na saída um sinal de 30 V. Se o circuito for alimentado por 12 V, por exemplo, você não tem como ter na saída do transistor uma tensão acima de 12 V, já que é essa a tensão que está sendo utilizada na alimentação do transistor. Ou seja, não há mágica alguma envolvida. O transistor amplifica um sinal entregue a ele dentro de um limite e limitado à sua polarização.

Para que você entenda melhor o funcionamento de um transistor sendo usado como amplificador, nada melhor do que analisarmos rapidamente um circuito de amplificador de áudio típico, que utiliza a configuração emissor comum. Na Figura 29.6 vemos esse circuito.

Note que, como citamos na Tabela 29.1, a configuração de emissor comum apresenta uma inversão de fase de 180º no sinal, isto é, o semiciclo positivo do sinal de entrada é invertido para um semiciclo negativo e vice-versa. Repare esse efeito pela onda senoidal que desenhamos na Figura 29.6 para exemplificar o funcionamento do amplificador. Em amplificadores de áudio comerciais, é comum o uso de amplificadores de mais de um estágio, isto é, a saída do amplificador é conectada à entrada de um segundo circuito amplificador, de forma a amplificar ainda mais o som. Como o segundo estágio irá inverter novamente o sinal, na saída do amplificador ele será apresentado de forma correta.

Repare que o circuito não é muito diferente do que havíamos apresentado para o circuito de emissor comum. A diferença está na existência de alguns resistores e capacitores, além da indicação de alimentação.

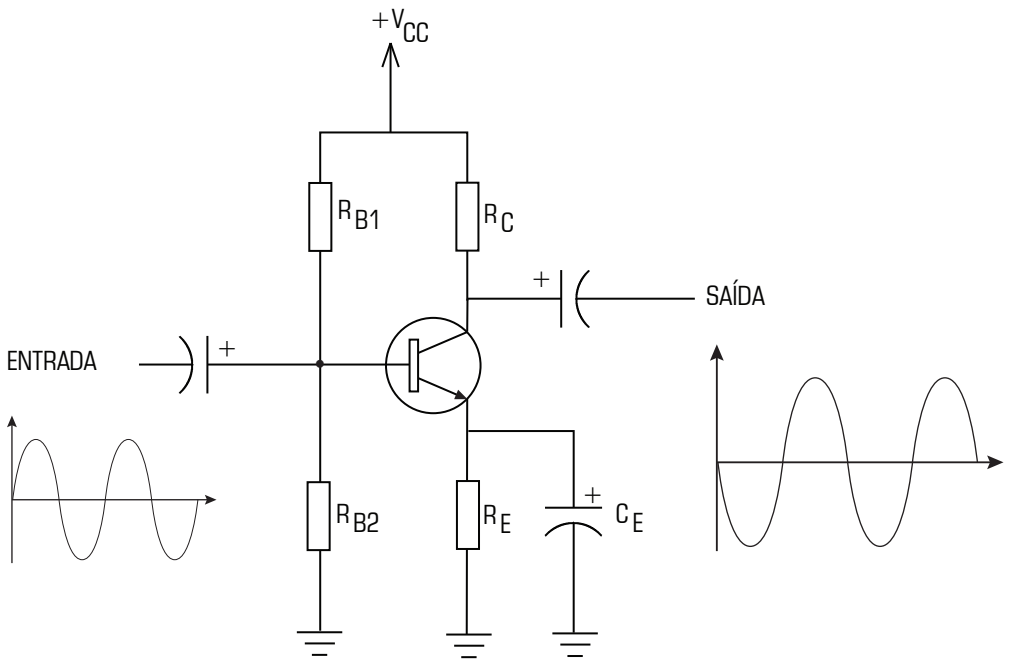


Figura 29.6: Amplificador de áudio.

Os resistores servem para polarizar o transistor, isto é, aplicar valores de tensões contínuas apropriadas para que o transistor opere conforme foi calculado no projeto do circuito. Mais adiante estaremos vendo de forma sucinta como esses cálculos são feitos. Por ora basta saber que esses cálculos são feitos baseados nos valores que são pretendidos para a corrente de coletor (I_C) e para a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}), entre outros.

Já os capacitores usados na entrada e saída são *capacitores de desacoplamento*, isto é, capacitores colocados de forma que só entre ou saia do circuito tensão alternada. A tensão contínua do circuito (a tensão da fonte) será bloqueada pelos capacitores. Com isso, a tensão da fonte não sai para o circuito que esteja na entrada do amplificador (um aparelho de CD, por exemplo) nem para o circuito que esteja na saída do amplificador (um alto-falante, por exemplo), não danificando esses circuitos. Em outras palavras, esses capacitores fazem com que a tensão de alimentação do circuito fique somente dentro do circuito. O capacitor colocado no emissor do transistor é chamado de capacitor de *by-pass* e serve para aumentar o ganho do circuito.

Seleção do Transistor

Lembre-se que, assim como todos os demais dispositivos semicondutores, os transistores possuem valores máximos, isto é, um valor máximo de corrente suportada e um valor máximo de tensão suportada. Um determinado modelo de transistor é escolhido de acordo com os valores pretendidos para o circuito. Por exemplo, se um circuito é calculado para ter uma corrente de coletor de 1 A obviamente não poderemos usar um transistor que tenha uma corrente máxima de coletor de 100 mA ou ele queimará quando usado neste circuito.

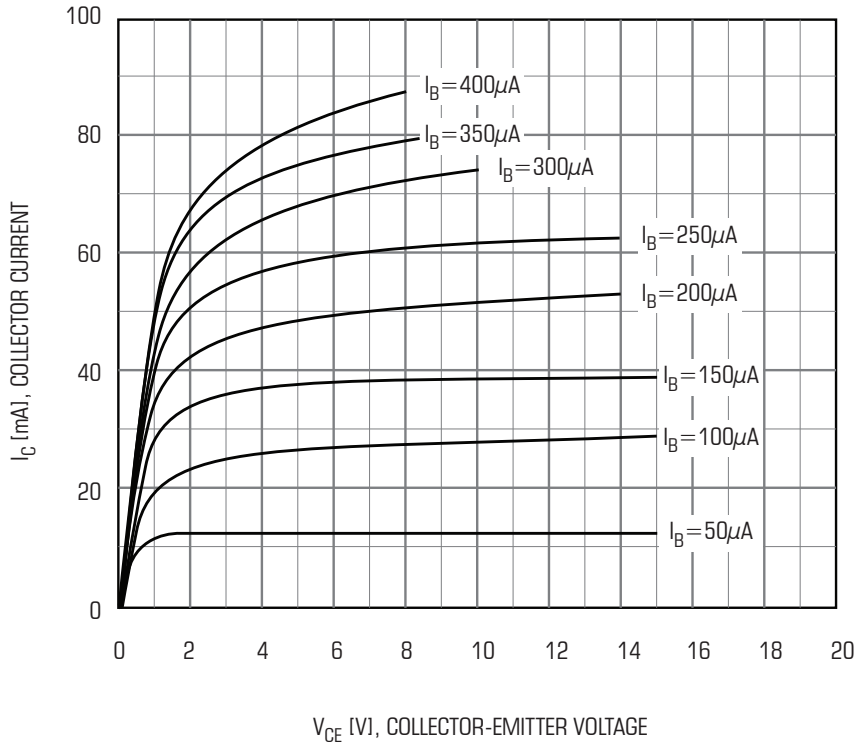


Figura 29.7: Curva característica do transistor BC547.

Todo transistor possui vários gráficos em seu *data sheet*. Um deles, chamado *curva característica*, pode ser usado para calcular e criar o circuito amplificador. Na Figura 29.7 vemos o exem-

plo real da curva característica do transistor BC547, que é bastante usado no hobby. A curva característica mostra o comportamento de três parâmetros: a corrente de coletor (I_C), que é a corrente de saída do transistor; a corrente de base (I_B), que é a corrente de entrada do transistor; e a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) do transistor. Como já explicado, os gráficos presentes no *data sheet* assumem a configuração emissor comum.

Em cima da curva característica, traçamos uma reta (chamada reta de carga) e descobrimos o ponto de operação "ideal" do transistor, chamado *ponto quiescente* ou simplesmente Q. Esse ponto é onde queremos que o transistor trabalhe e, descoberto este ponto, podemos facilmente calcular os valores dos resistores para a correta polarização do transistor, isto é, para que o transistor funcione no ponto Q.

Para traçar esta reta de carga, você deverá arbitrar o valor da fonte de alimentação do circuito, a corrente de base que será usada e a corrente de coletor máxima que você espera que o circuito use. A ideia é fazer com que o ponto Q fique preferencialmente ao centro da reta de carga. Isso ocorre porque, se a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) for muito baixa, o transistor entrará em *saturação*, deixando de funcionar corretamente, e se a corrente de coletor for muito baixa, o transistor entrará em *corte* e não funcionará (mais adiante explicaremos esta questão em mais detalhes). Ou seja, queremos fazer uma seleção de parâmetros em que o transistor funcione corretamente.

Para que esta ideia fique mais clara, vamos traçar uma reta de carga na curva característica desse nosso transistor. Para isso, estipulamos que a nossa fonte de alimentação seria de 12 V, sendo esse o valor que usamos para começar a reta no eixo x. Já para corrente de coletor, finalizamos a nossa reta em 100 mA, que é a corrente máxima desse transistor. Para que o nosso ponto Q ficasse aproximadamente ao centro da reta, escolhemos uma corrente de base de 200 μA. Com isso, temos que a corrente de coletor (I_C) que devemos usar nos cálculos do nosso circuito amplificador deverá ser de aproximadamente 50 mA, enquanto que a tensão entre emissor e coletor deverá ser de aproximadamente 6 V (basta seguir o ponto Q nos eixos x e y para achar esses valores). Ver Figura 29.8.

Podemos montar amplificadores com mais estágios. Por exemplo, nesse nosso caso, a corrente de saída será de 50 mA. Poderíamos montar um segundo estágio, isto é, um segundo amplificador, com uma corrente de entrada de 50 mA para amplificar ainda mais o sinal. Obviamente o transistor a ser usado no segundo estágio provavelmente seria outro (mais "potente"). Há uma infinidade de tipos de amplificadores que podemos construir a partir desse circuito básico.

A curva característica do transistor indica claramente o ganho de corrente (β) para este circuito amplificador. Aplicando a fórmula do ganho de corrente que vimos anteriormente, o ganho de corrente para esse circuito será de 250 ($\beta = 250$). Em outras palavras, esse nosso circuito amplificador irá amplificar a corrente de entrada 250 vezes.

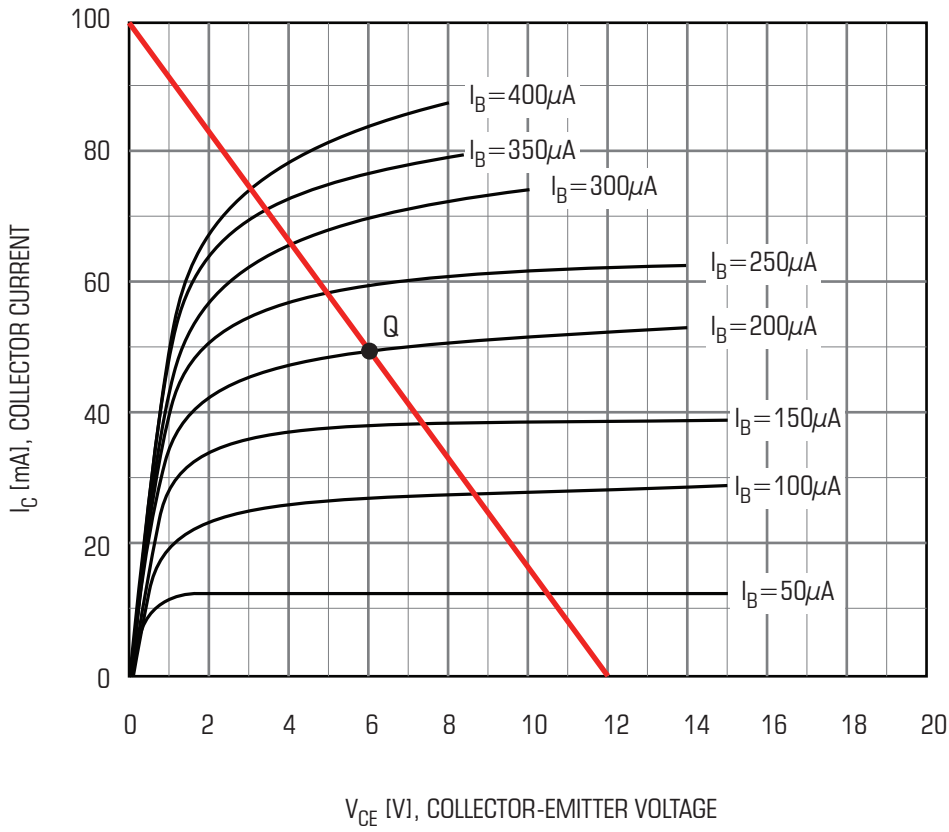


Figura 29.8: Reta de carga e ponto quiescente.

Corte e Saturação

Se a corrente de base aplicada no transistor for muito baixa ou inexistente, ele entrará em uma região chamada *região de corte*, onde a tensão entre coletor e emissor será também muito baixa. Podemos dizer, inclusive, que o transistor estará "desligado".

Por outro lado, se a tensão entre coletor e emissor for muito baixa, ele entrará em uma região chamada *região de saturação*. Quando o transistor entra nessa região, o amplificador também não funciona.

Por isso é que dissemos que o ideal é colocar o ponto Q no meio do gráfico: para que ele não entre em corte ou saturação.

Para que você entenda melhor essa questão de corte e saturação, considere a Figura 29.9. Nela temos um gráfico de como se comporta a saída do amplificador de acordo com a curva de carga traçada. Como a corrente I_C não é contínua, porém alternada, veja que o ponto Q deverá deixar um espaço para a corrente variar para cima e para baixo, de forma que o amplificador funcione a contento.

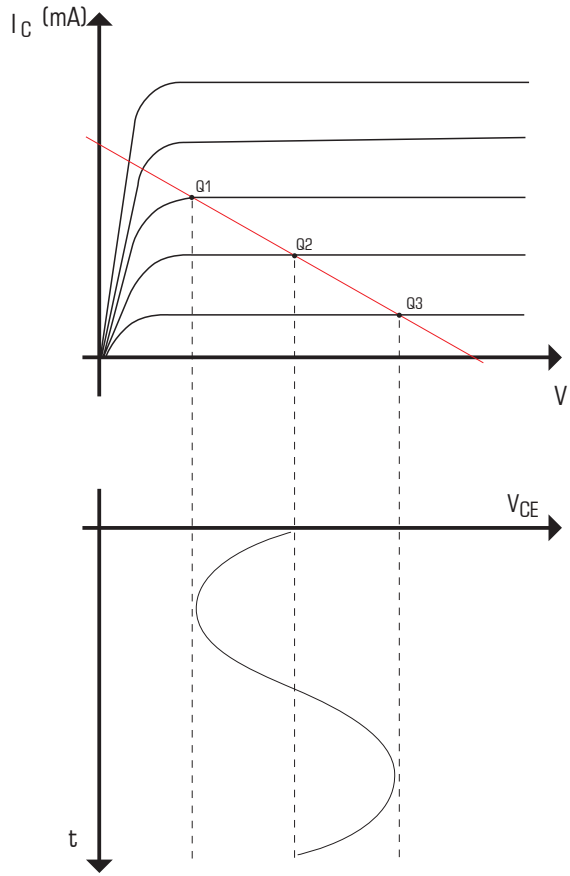


Figura 29.9: Funcionamento correto do amplificador.

Se o ponto Q for definido muito no alto e à esquerda, quando I_C variar, possivelmente o transistor entrará em sua região de saturação, fazendo com que parte da forma de onda seja cortada da saída do transistor, como vemos no gráfico da Figura 29.10.

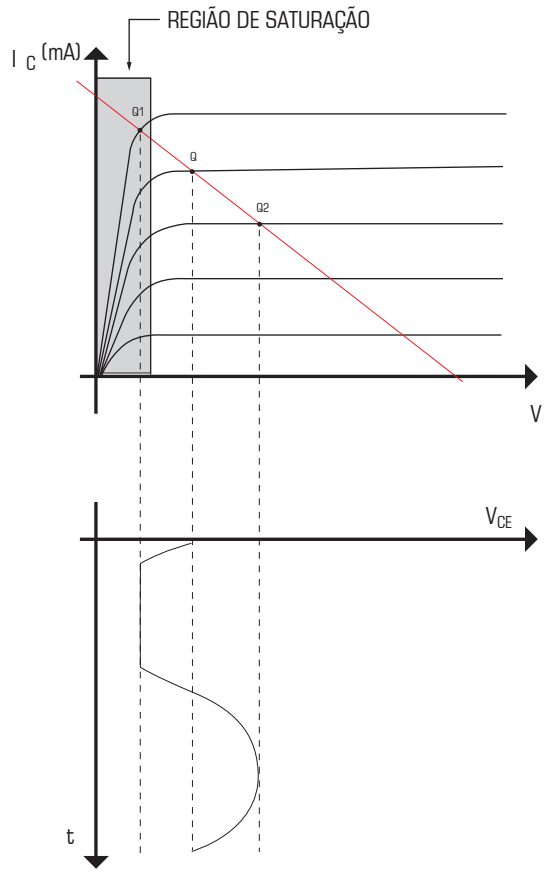


Figura 29.10: Transistor em saturação.

Já se o ponto Q for definido muito baixo e à direita, quando I_C variar, possivelmente o transistor entrará em sua região de corte, fazendo com que parte da forma de onda seja cortada

da saída do transistor, da mesma forma que ocorre na saturação, como vemos no gráfico da Figura 29.11.

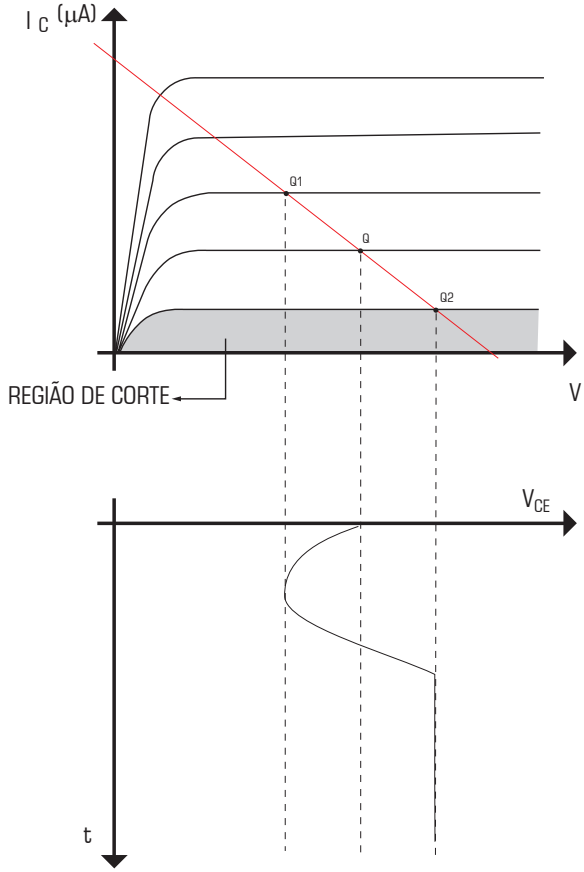


Figura 29.11: Transistor em corte.

Tudo isso que falamos nos leva a um macete prático: o ideal é definirmos que V_{CE} seja metade da tensão de alimentação do circuito amplificador (V_{CC}). Isso garantirá que o ponto Q ficará no centro do gráfico, evitando o corte e a saturação.

Como temos definido qual será o valor da tensão de alimentação do transistor, do valor da tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) e a corrente de coletor (I_C), fica muito fácil calcularmos os

demais valores para o circuito amplificador de emissor comum clássico que apresentamos. A seguir apresentaremos um método prático para o cálculo do valor dos resistores e do capacitor de *by-pass* para um amplificador de áudio típico usando a configuração de emissor comum.

Método Prático para Projeto de Amplificadores

Em um circuito emissor comum, a relação entre as três correntes (corrente de base, corrente de emissor e corrente de coletor) é dada através da seguinte fórmula.

$$I_E = I_C + I_B \tag{29.7}$$

Como normalmente a corrente de base é muito baixa, sendo muito inferior ao valor das correntes de coletor e de emissor, a soma da corrente de base com a corrente de emissor não altera muito o resultado. Por isso, em cálculos práticos, podemos desconsiderar a corrente de base (I_B) e podemos assumir que os valores das correntes de emissor e de coletor são iguais, ou seja, $I_E = I_C$.

O valor da tensão entre base e coletor ou base e emissor representa a queda de tensão de uma junção PN de silício, ou seja, podemos considerá-la como sendo de 0,7 V. Ou seja:

$$V_{BE} = V_{BC} = 0{,}7\ V \tag{29.8}$$

No método prático de projeto de amplificador de áudio de emissor comum, consideramos que a corrente que passa por R_{B1} e R_{B2} é a mesma (já que I_B é desprezível) e que ela vale 10% de I_C. A tensão sobre R_E consideramos que seja 10% de V_{CC}. V_{CE} será metade de V_{CC} e, com isso, a tensão sobre R_C será 40% de V_{CC} (já que a tensão sobre R_E é 10% de V_{CC}). E a reatância capacitiva do capacitor de *by-pass* (C_E) é 10% do valor de R_E. Para o cálculo do valor desse capacitor, utilizamos como valor de frequência 1 kHz, que é o valor padrão usado para cálculos de áudio.

Após efetuarmos os cálculos necessários, chegamos aos seguintes valores:

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - (V_{CC} / 10) + 0{,}7}{(I_C / 10)} \tag{29.9}$$

$$R_C = \frac{V_{CC} \cdot 0{,}4}{I_C} \tag{29.10}$$

$$R_E = \frac{(V_{CC} / 10)}{I_C} \tag{29.11}$$

$$R_{B2} = \frac{(V_{CC} / 10) + 0{,}7}{(I_C / 10)} \tag{29.12}$$

$$C_E = \frac{1}{2\pi \cdot 1.000 \cdot (R_E / 10)} \tag{29.13}$$

É claro que esses cálculos são todos de ordem prática, de forma a tornar o projeto de um amplificador de áudio um processo rápido. Obviamente em livros de eletrônica mais conservadores você encontrará cálculos muito mais precisos (que, no final das contas, o levará a encontrar valores muito próximos dos nossos).

PNP vs. NPN

Se você reparar, o tempo todo demos exemplos usando transistores bipolares do tipo NPN. E o transistor PNP? Qual é a diferença dele para o NPN? A diferença entre os transistores NPN e PNP está em sua polarização. A polarização do transistor PNP é invertida em relação ao transistor NPN, isto é, onde temos a fonte de alimentação em um transistor NPN, teremos o terra no transistor PNP e vice-versa. Ou seja, se quisermos montar um circuito amplificador utilizando um transistor PNP em vez de NPN, basta montar o mesmo circuito, porém onde está indicado terra no circuito passa a ser V_{CC} e vice-versa (ou seja, basta inverter a polaridade do circuito).

Classes de Amplificadores

Amplificadores podem ser classificados nos seguintes tipos:

- **Classe A:** O transistor amplifica completamente a forma de onda aplicada em sua entrada, sendo o tipo de amplificador que vimos até agora. O problema desse tipo de amplificador é a eficiência, isto é, o quanto eles consomem para sua própria operação. Amplificadores classe A têm eficiência na faixa de 50%, ou seja, para cada watt entregue em sua saída, ele consome o mesmo para sua própria operação.
- **Classe B:** Amplificadores classe B amplificam apenas a porção positiva ou negativa da forma de onda original. Obviamente a qualidade de áudio será inferior, pois na saída teremos apenas a metade da forma de onda original. No entanto, dois amplificadores classe B podem ser usados em paralelo, um amplificando a parte positiva e outro amplificando a parte negativa do sinal original, configuração conhecida como *push-pull* (ver Figura 29.12; nesta ilustração não desenhamos os resistores de polarização necessários). Amplificadores dessa classe apresentam maior eficiência, teoricamente de até 78,5% (ou seja, para cada watt entregue na saída, o amplificador consome 0,2739 W para seu funcionamento). O problema de amplificadores de classe B é que nem sempre dá para fazer com que os transistores "casem" os dois semiciclos que foram amplificados perfeitamente, fazendo que a saída não seja "perfeita". Este problema é conhecido como *distorção de cross-over*.

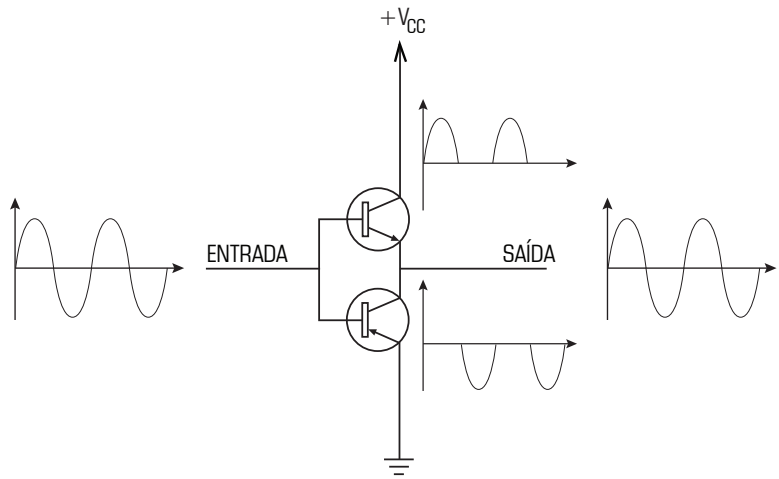


Figura 29.12: Amplificador push-pull classe B.

- **Classe AB:** Amplificadores classe AB corrigem o problema de distorção de cross-over dos amplificadores push-pull classe B fazendo com que os transistores fiquem ligados por um pouco mais de tempo, fazendo com que o "casamento" das duas porções do sinal (positiva e negativa) seja "perfeita". Esses amplificadores apresentam eficiência um pouco inferior aos amplificadores classe B (já que cada transistor precisa também amplificar um pouco do semiciclo oposto – ver Figura 29.13), porém bem acima dos amplificadores classe A.
- **Classe C:** Amplificadores classe C amplificam apenas uma pequena parte (menos de 50%) do sinal original. Com isso, a saída deste tipo de amplificador não terá boa fidelidade. A vantagem, no entanto, é a sua eficiência, de até 90%. Este tipo de amplificador pode ser usado em aplicações onde fidelidade não é necessária (por exemplo, megafones, que são usados para amplificar apenas a voz humana e não música).
- **Classe D:** Amplificadores classe D funcionam de maneira completamente diferente. Eles convertem o sinal original em uma sequência de pulsos retangulares, e esta forma de onda retangular é amplificada e posteriormente convertida de volta em um sinal analógico. Esta técnica é chamada modulação por largura de pulso (PWM). Isso permite aos amplificadores classe D obterem alta eficiência e, ao mesmo tempo, alta fidelidade. Fazendo um paralelo com fontes de alimentação, amplificadores classe A seriam como se fossem fontes de alimentação lineares, enquanto que amplificadores classe D seriam como se fossem fontes de alimentação chaveadas (esta analogia ficará mais clara após a leitura do Capítulo 31).

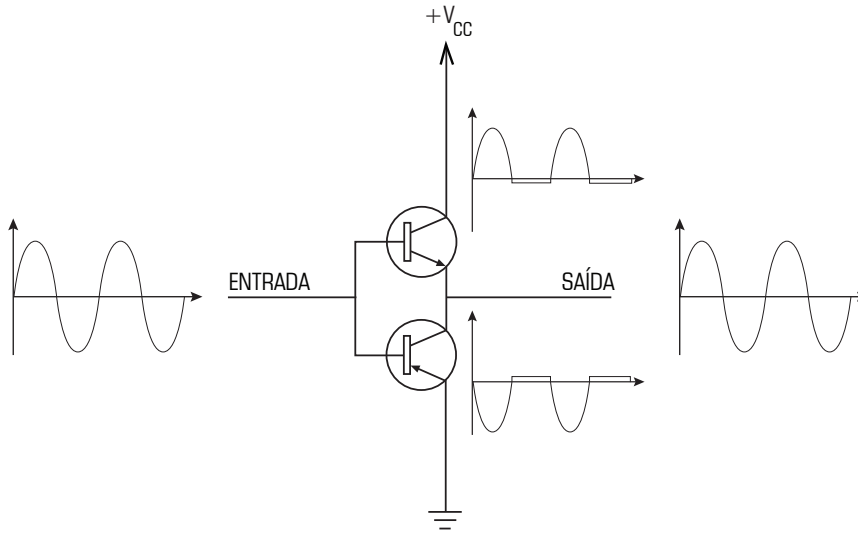


Figura 29.13: Amplificador push-pull classe AB.

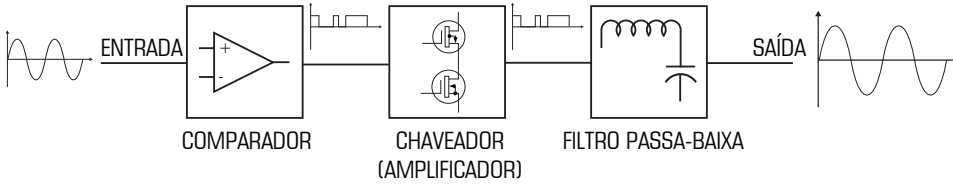


Figura 29.14: Diagrama em blocos de um amplificador classe D.

Existem outras classes de amplificadores, mas neste livro abordamos somente as mais básicas e usuais.

Transistor Como Chave

O transistor também pode ser usado como uma chave eletrônica. Nesse caso, ele operará somente ou no corte ou na saturação, funcionando como se fosse um SCR ou TRIAC, porém controlando circuitos de corrente contínua e não circuitos de corrente alternada.

Na Figura 29.15 vemos um exemplo simples de um transistor sendo usado como chave. Quando houver corrente na base do transistor, ele entrará em saturação, fazendo com que a lâmpada se acenda. Cortando-se a corrente na base do transistor, ele entrará em corte, desligando a lâmpada. Esse mesmo método pode ser usado para acionar um relé ou qualquer outro circuito de corrente contínua que você queira ativar, bastando substituir a lâmpada por outro circuito.

Se você quiser que o acionamento seja invertido, isto é, que a chave seja acionada quando a corrente na base for cortada e não adicionada, basta utilizar um transistor PNP no lugar de um transistor NPN para que esse efeito ocorra.

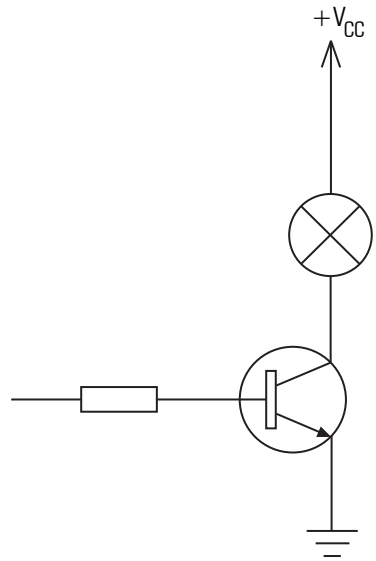


Figura 29.15: Transistor como chave.

Você ainda pode utilizar o transistor como chave para fornecer uma maior tensão e/ou corrente do que um circuito está acostumado a fornecer. Um exemplo típico ocorre em eletrônica digital. Os circuitos integrados digitais só trabalham com dois valores, 0 e 1, que podem representar uma lâmpada apagada e uma lâmpada acesa. Normalmente o valor zero é representado por 0 V e o valor 1, por 5 V. Se você quiser acionar um circuito de 12 V, não conseguirá fazer isso diretamente. Porém, poderá usar um transistor como chave ligado em 12 V. Assim, quando na saída do circuito digital houver 5 V, o transistor será acionado (entrará em saturação) e emitirá 12 V para o circuito que você deseja acionar.

Outro exemplo está no caso de fornecer mais corrente. Você poderia ligar um LED diretamente na saída de um circuito integrado digital para que o LED acendesse ou apagasse dependendo do estado da saída do circuito (0 ou 1). Só que circuitos integrados digitais normalmente não fornecem corrente suficiente para o LED acender e, se você fizer isso, poderá até mesmo queimar o circuito integrado. Uma solução é ligar um transistor como chave na saída do circuito, ligando e desligando um LED, e o V_{CC} do transistor pode ser o mesmo V_{CC} que alimenta os circuitos integrados (5 V). Ou seja, a alimentação do LED será fornecida diretamente pela fonte de alimentação do circuito e não pelo circuito integrado.

Transistor Como Regulador de Tensão

Um uso muito interessante de transistores é na amplificação da corrente máxima que um diodo Zener pode suportar. Por exemplo, um diodo Zener de 400 mW e 4,7 V suporta uma corrente máxima de 85 mA (I = P / V, ou seja, 400 mW / 4,7 V). Um diodo Zener de 1 W e 4,7 V suporta, no máximo, 212 mA (I = P / V, ou seja, 1 W / 4,7 V). Para construirmos uma fonte de alimentação de 4,7 V capaz de fornecer uma corrente máxima de 1 A precisaríamos de um diodo Zener de pelo menos 4,7 W (P = V · I, ou seja, 4,7 V · 1 A). A solução pode ser o próximo circuito, mostrado na Figura 29.16. Neste circuito, usamos um diodo Zener de apenas 400 mW como referência para o transistor. A corrente máxima que esse circuito regulador será capaz de fornecer será estipulada não mais pelo Zener, mas sim pela corrente máxima suportada do transistor (I_C).

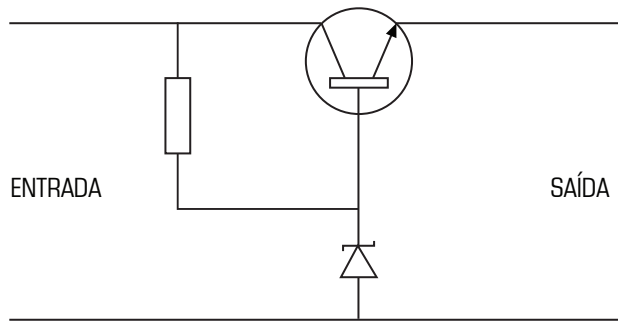


Figura 29.16: Transistor como regulador de tensão.

Testando Transistores Bipolares

Transistores bipolares, assim como diodos, podem ser facilmente testados utilizando um multímetro na escala de resistência (no caso de multímetros analógicos) ou na escala de teste de diodos (no caso de multímetros digitais). Para efetuar esse teste, o transistor obrigatoriamente precisa estar fora do circuito, isto é, ele precisa estar solto na bancada. Isso ocorre porque os resistores e demais componentes existentes no circuito alterarão o resultado, fazendo com que o resultado lido pelo multímetro seja falso. Você deverá desligar o circuito antes de remover o componente, é claro.

Como o transistor possui duas junções PN, ele pode ser testado como se fossem dois diodos.

Antes de começar o teste, o ideal é você saber se o transistor é NPN ou PNP e também a sua pinagem, mas é possível testar transistores não sabendo a sua pinagem, como explicaremos.

O teste de um transistor não é tão simples quanto o teste de um diodo, pois possui várias etapas, lembrando que as ponteiras do multímetro analógico possuem polaridade invertida. É claro que, depois de você ter pego prática, o teste ocorre rapidamente. Para facilitar, elaboramos um roteiro passo a passo para teste de transistores com multímetros analógicos e com multímetros digitais.

Testando Transistores Usando Multímetro Analógico

Você deverá testar o seguinte:

- **Base-emissor direto:** Em transistores NPN, ponteira preta na base e ponteira vermelha no emissor. Em transistores PNP, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha na base. Deverá marcar baixa resistência.

- **Base-emissor inverso:** Em transistores NPN, ponteira vermelha na base e ponteira preta no emissor. Em transistores PNP, ponteira vermelha no emissor e ponteira preta na base. Deverá marcar resistência infinita.

- **Base-coletor direto:** Em transistores NPN, ponteira preta na base e ponteira vermelha no coletor. Em transistores PNP, ponteira preta no coletor e ponteira vermelha na base. Deverá marcar baixa resistência.

- **Base-coletor inverso:** Em transistores NPN, ponteira vermelha na base e ponteira preta no coletor. Em transistores PNP, ponteira vermelha no coletor e ponteira preta na base. Deverá marcar resistência infinita.

- **Emissor-coletor direto:** Tanto em transistores NPN quanto PNP, ponteira vermelha no emissor e ponteira preta no coletor. Deverá marcar resistência infinita.

- **Emissor-coletor inverso:** Tanto em transistores NPN quanto PNP, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha no coletor. Deverá marcar resistência infinita.

Qualquer marcação diferente das mencionadas significa que o transistor está queimado e deverá ser substituído.

Testando Transistores Usando Multímetro Digital

Você deverá testar o seguinte:

- **Base-emissor direto:** Em transistores NPN, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha na base. Em transistores PNP, ponteira vermelha no emissor e ponteira preta na base. Deverá marcar a queda de tensão entre base-emissor (V_{BE}) que será tipicamente entre 0,5 V e 0,8 V no caso de transistores de silício.
- **Base-emissor inverso:** Em transistores NPN, ponteira vermelha no emissor e ponteira preta na base. Em transistores PNP, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha na base. Deverá marcar infinito.
- **Base-coletor direto:** Em transistores NPN, ponteira preta no coletor e ponteira vermelha na base. Em transistores PNP, ponteira vermelha no coletor e ponteira preta na base. Deverá marcar a queda de tensão entre base-coletor (V_{BC}) que será tipicamente entre 0,5 V e 0,8 V no caso de transistores de silício.
- **Base-coletor inverso:** Em transistores NPN, ponteira vermelha no coletor e ponteira preta na base. Em transistores PNP, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha na base. Deverá marcar infinito.
- **Emissor-coletor direto:** Tanto em transistores NPN quanto PNP, ponteira vermelha no emissor e ponteira preta no coletor. Deverá marcar infinito.
- **Emissor-coletor inverso:** Tanto em transistores NPN quanto PNP, ponteira preta no emissor e ponteira vermelha no coletor. Deverá marcar infinito.

Qualquer marcação diferente das mencionadas significa que o transistor está queimado e deverá ser substituído.

Testando Transistores Com Pinagem Desconhecida

Se você não souber a pinagem do transistor, ainda é possível testá-lo, embora o teste não seja completo. Nesse caso, você deverá usar as ponteiras do multímetro em todas as combinações possíveis:

- Ponteira vermelha no pino 1 e ponteira preta no pino 2

- Ponteira preta no pino 1 e ponteira vermelha no pino 2
- Ponteira vermelha no pino 2 e ponteira preta no pino 3
- Ponteira preta no pino 2 e ponteira vermelha no pino 3
- Ponteira vermelha no pino 1 e ponteira preta no pino 3
- Ponteira preta no pino 1 e ponteira vermelha no pino 3

Em nenhuma das posições o multímetro deverá marcar zero. Se isso ocorrer, significa que o transistor está queimado. Da mesma forma, se em *todos* os testes o multímetro marcar infinito, significa que o transistor está queimado.

Transistor Darlington

O transistor Darlington consiste em dois transistores ligados em cascata em um só encapsulamento, como mostra a Figura 29.17. Fisicamente falando, um transistor Darlington possui o mesmo aspecto de um transistor de potência tradicional. Sua construção interna permite obter um ganho maior de corrente, sendo, portanto, um transistor de alta potência.

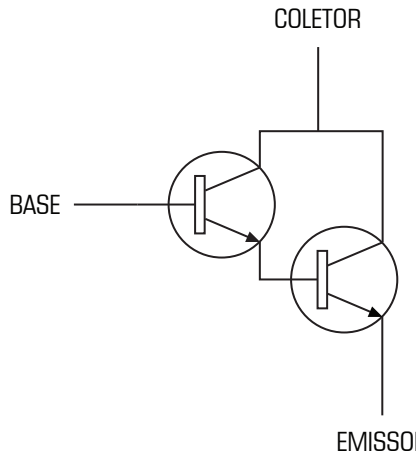


Figura 29.17: Estrutura interna de um transistor Darlington.

Transistor de Efeito de Campo (FET)

O transistor de efeito de campo, também chamado FET (Field Effect Transistor) ou transistor unipolar, é um transistor construído de maneira especial. A estrutura do transistor de efeito de campo pode ser vista na Figura 29.18. Seu aspecto físico é o mesmo de transistores bipolares e você só saberá estar diante de um transistor convencional ou de um transistor de efeito de campo através do *data sheet* do componente.

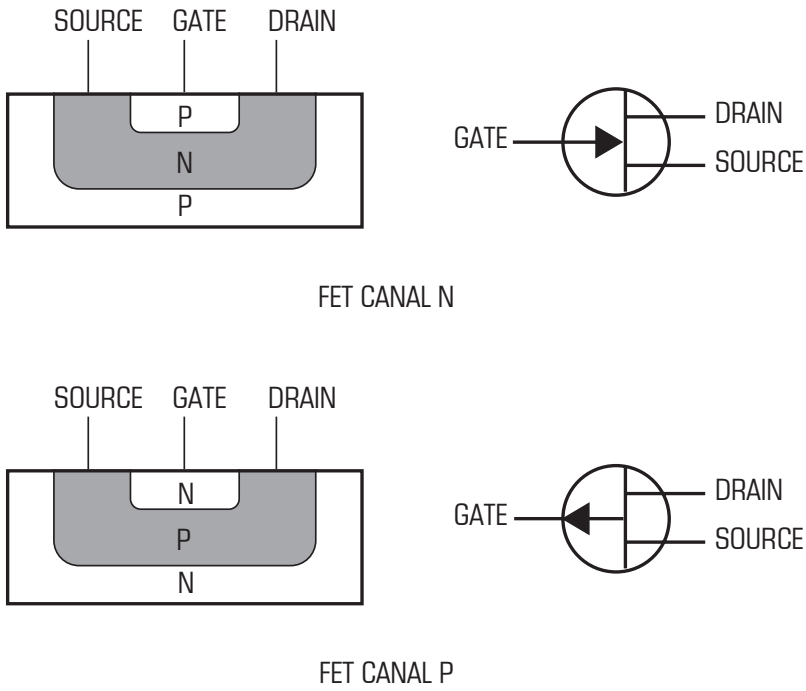


Figura 29.18: Transistor de efeito de campo (FET).

O FET possui três terminais como o transistor convencional, só que eles são chamados source (fonte), drain (dreno) e gate (portão). Esses três terminais são equivalentes diretos do emissor, coletor e base, respectivamente. A corrente em um FET circula da fonte para o dreno, passando por um canal. Este canal é controlado pelo gate. Aplicando-se uma tensão no gate, é criado um campo elétrico que dificulta a passagem da corrente elétrica pelo canal. O FET é classificado de

acordo com o tipo de material que esse canal utiliza, se material do tipo N (FET canal N) ou do tipo P (FET canal P).

Aplicações

As aplicações típicas de um FET são as mesmas de um transistor convencional: amplificador ou chave. O FET, no entanto, apresenta algumas grandes vantagens sobre os transistores convencionais (transistores bipolares): alta impedância de entrada (na ordem de 100 MΩ), baixíssimo nível de ruído, pois é praticamente imune a interferências, maior estabilidade térmica e menor consumo.

A alta impedância permite criar amplificadores de vários estágios muito mais facilmente do que ocorre com transistores bipolares.

Na Figura 29.19 nós vemos o circuito de um amplificador típico usando FET. Repare que não há muita diferença para um amplificador usando um transistor de junção.

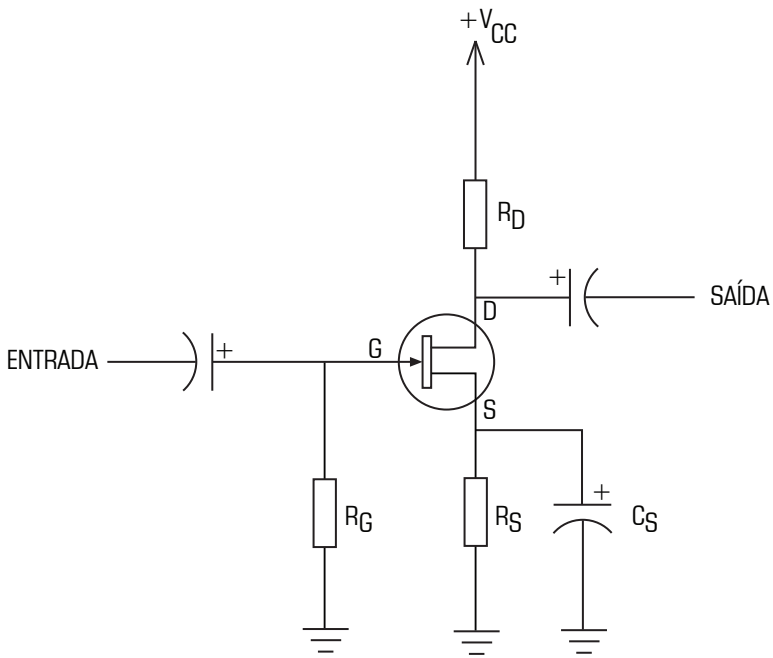


Figura 29.19: Amplificador usando FET.

MOSFET

O transistor de efeito de campo que acabamos de ver é também chamado de JFET (Junction Field Effect Transistor) ou FET de junção. Existe um outro tipo de tecnologia para construção de transistores de efeito de campo chamada MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor FET) ou IGFET (Insulated-Gate FET). Por causa de sua construção interna, transistores MOSFET possuem uma impedância de entrada ainda maior do que os transistores de efeito de campo tradicionais, na ordem de 1 GΩ, e apresentam menor consumo.

Internamente, a grande diferença entre FET e MOSFET é o uso de óxido de silício (MOS significa Metal-Oxide Semiconductor ou semicondutor de óxido metálico) no segundo. Na Figura 29.20 vemos a estrutura interna de transistores MOSFET. Transistores MOSFET com canal N também são chamados NMOS e transistores MOSFET com canal P também são chamados PMOS.

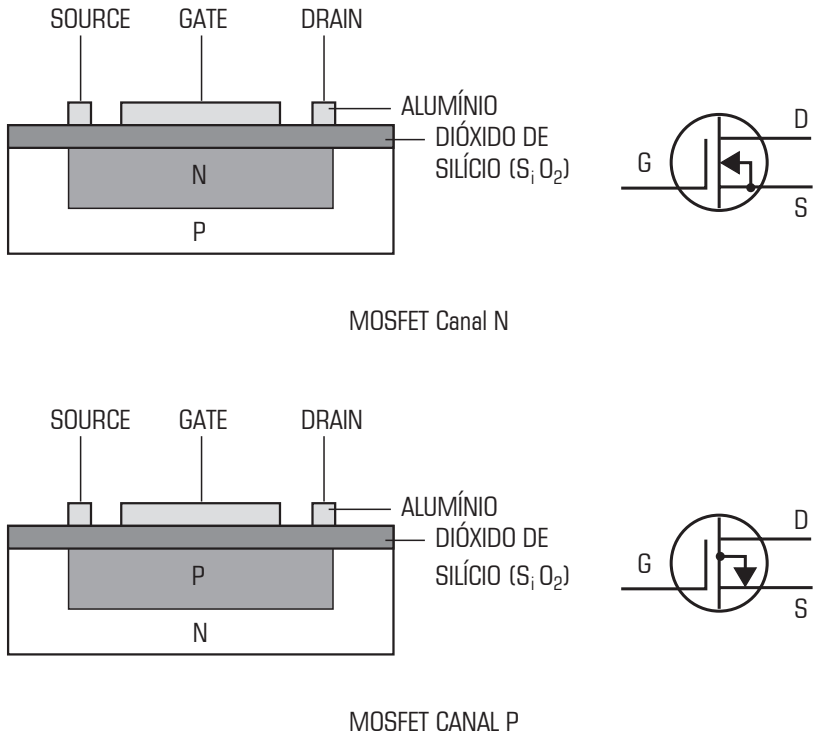


Figura 29.20: Estrutura interna e simbologia de transistores MOSFET.

Se você resolver se aprofundar no estudo da eletrônica e estudar também eletrônica digital, verá que os modernos circuitos integrados digitais são construídos internamente com transistores do tipo MOSFET. Circuitos integrados são circuitos contendo centenas, milhares ou mesmo milhões de transistores internamente.

Características

Assim como ocorre com transistores bipolares e diodos, as características de transistores FET e MOSFET podem ser vistas no *data sheet* do componente. De todas as características presentes, gostaríamos de destacar as seguintes:

- **Corrente máxima de dreno (I_D):** É a corrente máxima suportada pelo transistor.
- **Resistência dreno-fonte quando o transistor está conduzindo (R_{DS}(on)):** Indica a resistência do transistor quando ele está conduzindo. Quanto menor este parâmetro, menor será o consumo do transistor para seu funcionamento.
- **De-rating:** Assim como diodos e transistores bipolares, a capacidade de corrente de transistores FET e MOSFET é limitada pela temperatura do componente. Felizmente, atualmente a maioria dos fabricantes tem se conscientizado da importância disso e divulgado a corrente máxima suportada pelo transistor (I_D) não só a 25º C, mas também a 100º C. De qualquer forma, o *data sheet* normalmente apresenta a curva de *de-rating* do transistor. Só para um exemplo real de como a temperatura influencia tremendamente na corrente máxima suportada, considere o transistor MOSFET SPA16N50C3. Sua corrente máxima a 25º C é de 16 A, mas a 100º C ela cai para 10 A, uma queda de 62,5%.

Testando Transistores FET e MOSFET

O teste de transistores FET e MOSFET deve ser feito como descrito anteriormente no tópico *Testando Transistores Com Pinagem Desconhecida*. Se em alguma das posições das ponteiras o multímetro marcar resistência zero, significa que o componente está queimado. Lembrando que este teste tem de ser feito com o componente fora do circuito, do contrário os resultados estarão errados.

Fototransistor

Um fototransistor é um transistor onde a sua base é um sensor de luz. Fisicamente falando, um fototransistor é parecido com um LED.

O fototransistor pode ser usado, portanto, em qualquer aplicação a ser ativada por luz, tais como sensores, sistemas de alarme etc. Ele será simplesmente um transistor operando como chave, onde a chave estará aberta (desligada), quando não houver presença de luz, e fechada (ligada), quando houver presença de luz.

Uma aplicação importante de fototransistor é no controle remoto usado por equipamentos eletrônicos tais como equipamentos de áudio e vídeo, onde é usado um fototransistor infravermelho, isto é, capaz de "reconhecer" luz deste comprimento de onda. Esse fototransistor é colocado no aparelho. Já o controle remoto possui um LED infravermelho, que emite luz nesse comprimento de onda, enviando informações para o fototransistor existente no receptor. Como a luz infravermelha é invisível, não vemos essa luz quando pressionamos alguma tecla do controle remoto do aparelho.

Cada tecla do controle remoto faz com que uma determinada sequência seja enviada do controle para o aparelho. Essa sequência é uma série particular onde o LED do controle é alternado rapidamente entre aceso e apagado. Como aceso representa 1 e apagado representa 0, podemos programar infinitos códigos. Como cada tecla possui um código de "aceso" e "apagado" diferente (sequências diferentes de 0s e 1s), o receptor sabe qual é a função que você está acionando no controle remoto. Da mesma forma, um controle remoto de um aparelho (ou de um fabricante) não aciona outro aparelho (ou um aparelho do mesmo tipo de outro fabricante) por usar sequências diferentes de 0s e 1s, isto é, de aceso e apagado. Controles remotos universais "conhecem" as sequências usadas por aparelhos de diversos fabricantes, ao passo que controles remotos programáveis possuem memória para permitir ler e armazenar a sequência gerada por qualquer controle remoto.

Lembrando ainda que controles remotos podem ser construídos com outras tecnologias, como o uso de radiofrequência, especialmente se queremos uma operação a uma maior distância e/ou que não necessite apontar o LED do controle remoto ao fototransistor do aparelho, como é o caso dos aparelhos de controle remoto usado em portas de garagem e alarmes de carro.

Transistor Unijunção (UJT)

O transistor unijunção, também chamado UJT (UniJunction Transistor), é um tipo especial de transistor que, como o nome diz, possui apenas uma junção PN, em vez de duas, como ocorre nos transistores bipolares, fazendo com que o transistor tenha um emissor e duas bases.

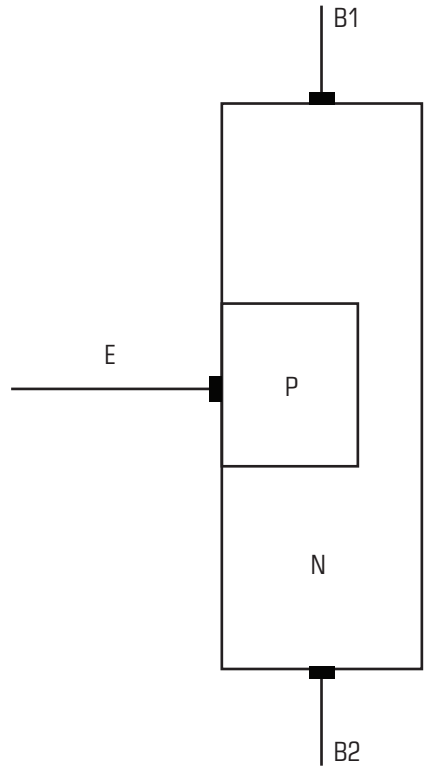


Figura 29.21: Estrutura interna de transistores unijunção.

A curva característica de um transistor unijunção pode ser vista na Figura 29.22. Com um aumento na tensão aplicada sobre o emissor (V_E), a corrente no emissor (I_E) aumenta até atingir um ponto de pico (onde I_P e V_P são os maiores possíveis). A partir desse ponto, o transistor entra em sua região de resistência negativa, onde a corrente no emissor aumenta enquanto a tensão no emissor diminui. A tensão e a corrente aplicadas no emissor atingem seus menores valores no ponto de vale. Aumentando a corrente do emissor além do ponto de vale faz o transistor entrar em saturação.

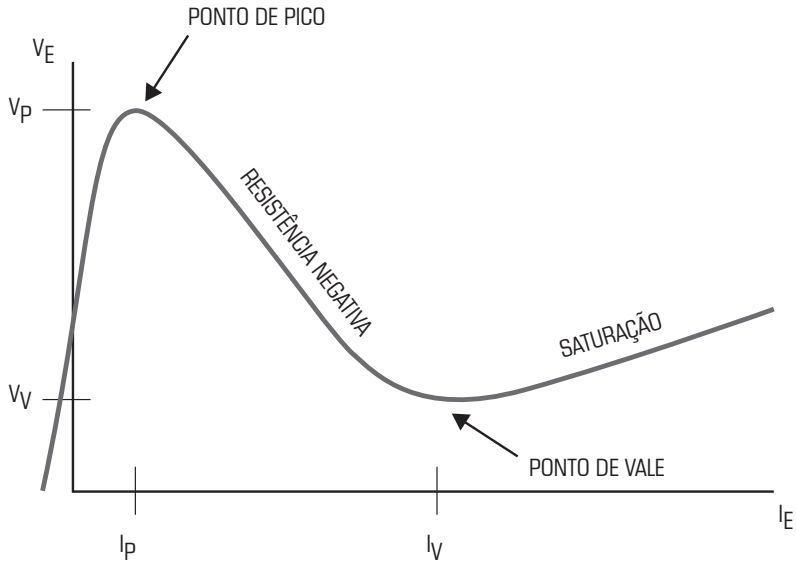


Figura 29.22: Curva característica de transistores unijunção.

Parâmetros

Os valores das correntes de pico e vale são dados no *data sheet* do transistor unijunção, bem como o valor da resistência interna do transistor. A letra grega eta minúscula (η) representa uma proporção entre as resistências das duas bases, que é dada no *data sheet* do componente, e esta proporção está normalmente situada entre 0,4 e 0,8, dependendo do modelo do transistor (se no *data sheet* for apresentada uma faixa de valores, use o valor médio nos cálculos). V_{CC} é a alimentação do circuito.

$$R_{BB0} = R_{B1} + R_{B2} \quad (29.14)$$

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (29.15)$$

$$\eta = \frac{R_{B1}}{R_{BB0}} \quad (29.16)$$

$$V_P = 0{,}7\ V + \eta \cdot V_{CC} \quad (29.17)$$

$$V_V = \frac{V_{CC}}{10} \quad (29.18)$$

Você precisará saber esses valores para poder desenhar circuitos usando transistores unijunção.

Aplicação

Transistores unijunção funcionam basicamente como osciladores (geradores de pulso), e o circuito típico de um oscilador usando um transistor unijunção pode ser visto na Figura 29.23. Nesta ilustração mostramos também as formas de onda obtidas no emissor, na base 1 e na base 2 do transistor.

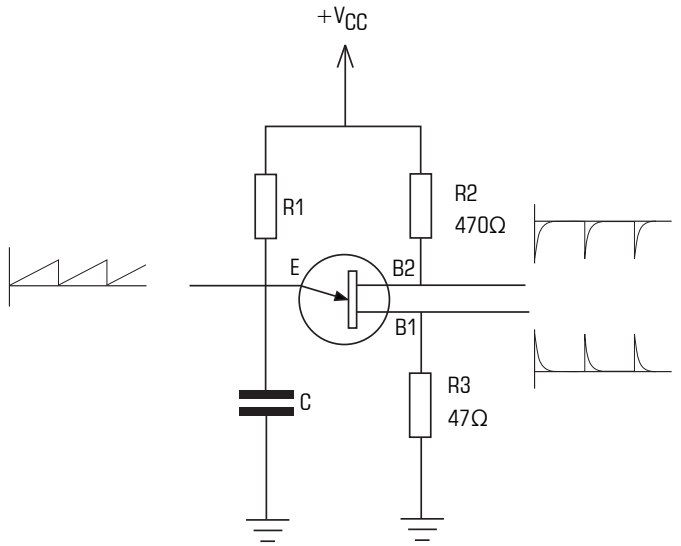


Figura 29.23: Oscilador de relaxação usando um transistor unijunção.

O valor de R1 deverá estar dentro da seguinte faixa:

$$\frac{V_{CC} - V_V}{I_V} < R1 < \frac{V_{CC} - V_P}{I_P} \qquad (29.19)$$

E a frequência do oscilador é dado através da seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{R1 \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)} \qquad (29.20)$$

Ou seja, você deverá escolher os valores de C e R1 de acordo com a frequência de oscilação pretendida.

Com a popularização de circuitos integrados que efetuam a mesma função e apresentam cálculos bem mais simples (em particular o circuito integrado 555, que estudaremos no próximo capítulo), transistores unijunção caíram em desuso entre hobistas.

◆◆◆

Exercícios

1. Considere a curva característica do transistor BC635, mostrada na Figura 29.24. Trace uma reta de carga para uma corrente de coletor de 200 mA e tensão de alimentação de 24 V. Quais serão os valores de V_{CE}, I_C e I_B do ponto quiescente? Qual será o ganho de corrente?

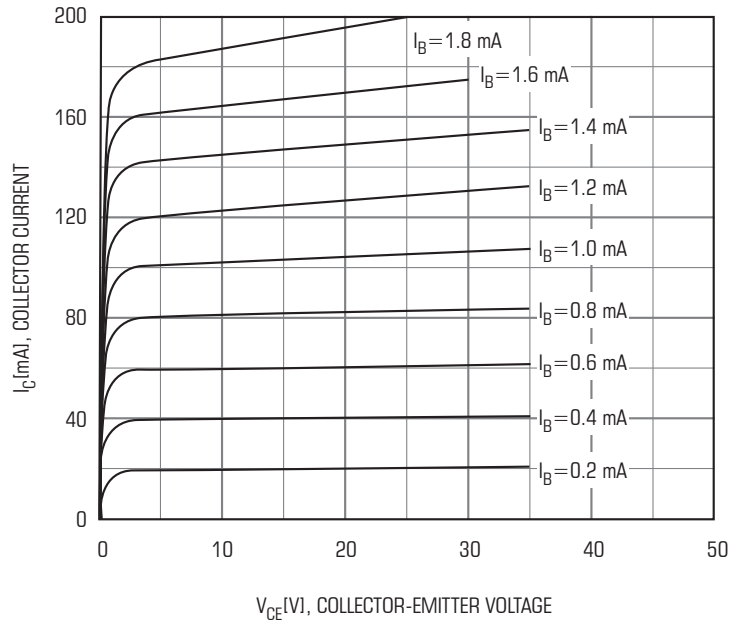


Figura 29.24: Curva característica do transistor BC635.

2. Construa um amplificador classe A usando o método prático baseado no transistor 2N2222, onde queremos uma corrente de coletor de 500 mA e tensão de alimentação de 12 V. Verifique, ainda, quais são os valores comerciais mais próximos dos componentes calculados.
3. Projete um oscilador de relaxação baseado no transistor unijunção 2N2646 (dados: η entre 0,56 e 0,75, $I_P = 1\ \mu A$ e $I_V = 6$ mA) com tensão de alimentação de 6 V e frequência de oscilação de 1 kHz. Vamos arbitrar o valor de R1 como sendo de 1 kΩ.

Capítulo 30
Circuitos Integrados

Introdução

Circuitos integrados, também chamados C.I.s, são dispositivos contendo um circuito pronto dentro de um encapsulamento. São os famosos "chips".

Os circuitos integrados podem ser classificados basicamente em dois tipos: lineares (ou analógicos) e digitais. Os circuitos integrados digitais são compostos por circuitos lógicos utilizados na eletrônica digital – tais como portas lógicas, flip-flops, memórias, registradores de deslocamento, contadores etc. – assunto que não abordamos neste livro (embora nós iremos falar sobre circuitos contadores neste capítulo, pois eles são também usados em vários circuitos de eletrônica analógica). Já os circuitos integrados lineares são formados por circuitos utilizados pela eletrônica analógica – eletrônica que vimos estudando ao longo do livro – tais como amplificadores, osciladores e reguladores de tensão.

A grande vantagem de se usar um circuito integrado é que ele traz, em um só circuito, o que antes teria necessidade de vários componentes (especialmente transistores, diodos e resistores) para obter o mesmo resultado. Circuitos integrados amplificadores, que estudaremos neste capítulo, são um excelente exemplo.

É claro que seria impossível explicarmos o funcionamento de todos os circuitos integrados existentes no mercado. Neste capítulo resolvemos abordar componentes "clássicos" e amplamente utilizados no hobby, de forma que você tenha uma ideia geral do funcionamento e projeto de circuitos analógicos usando circuitos integrados.

Construção

Circuitos integrados são construídos a partir de uma técnica chamada fotolitografia. De uma maneira bem resumida, ela funciona da seguinte forma.

Os engenheiros projetam o circuito que vai dentro do circuito integrado, e criam um filme (também chamada máscara) contendo este circuito. Dependendo da complexidade do circuito, o chip terá de ter várias camadas, e uma máscara é criada para cada camada.

Na fábrica do chip, pega-se um disco "virgem" de silício purificado, chamado wafer, e aplica-se a máscara sobre ele. O circuito integrado é muito menor do que o wafer e, para aumentar a produtividade, a máscara é multiplicada de forma a usar o máximo possível do wafer. Ou seja, um único wafer será usado para fabricar vários chips.

Através de uma reação fotoquímica, a imagem da máscara é impressa no wafer, e o excedente de material é removido. Se o chip tiver mais de uma camada (normalmente ele tem), a máscara da próxima camada é aplicada e o processo é repetido até que todas as camadas tenham sido literalmente impressas no wafer.

Após todas as camadas do chip terem sido criadas, o wafer é então cortado, gerando vários chips (pastilhas de silício).

Após serem cortadas, estas pastilhas são encapsuladas, isto é, são adicionados terminais e um invólucro (normalmente plástico de cor preta) envolvendo a pastilha de silício. As pastilhas de silício são normalmente minúsculas e frágeis, e o processo de encapsulamento é feito para protegê-las, criando um componente maior que é mais fácil de ser manipulado, e adicionando terminais grandes o suficiente para permitir a soldagem do componente. Outro papel do encapsulamento é dissipar o calor gerado pela pastilha de silício.

Em seguida, o circuito integrado é testado e, estando funcionando corretamente, ele estará pronto para a venda.

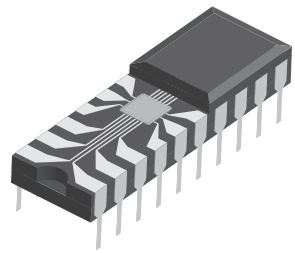


Figura 30.1: Vista explodida de um circuito integrado.

Após encapsulado, a maior parte do circuito integrado é feita de material inerte (plástico, por exemplo). O chip (pastilha de silício) propriamente dito está localizado ao centro do componente, correspondendo a apenas uma pequena fração de seu tamanho. Na Figura 30.1 nós mostramos a vista explodida de um circuito integrado para você entender isso melhor.

Encapsulamento

Embora o aspecto mais usual dos circuitos integrados seja a famosa "centopeia preta" (encapsulamento chamado DIP, Dual In Parallel, ou DIL, Dual In Line), circuitos integrados podem ser construídos com uma infinidade de encapsulamentos. Na Figura 30.2 nós vemos os tipos de encapsulamento mais comuns – existem vários outros encapsulamentos possíveis. Mostramos apenas os mais usuais para circuitos integrados lineares.

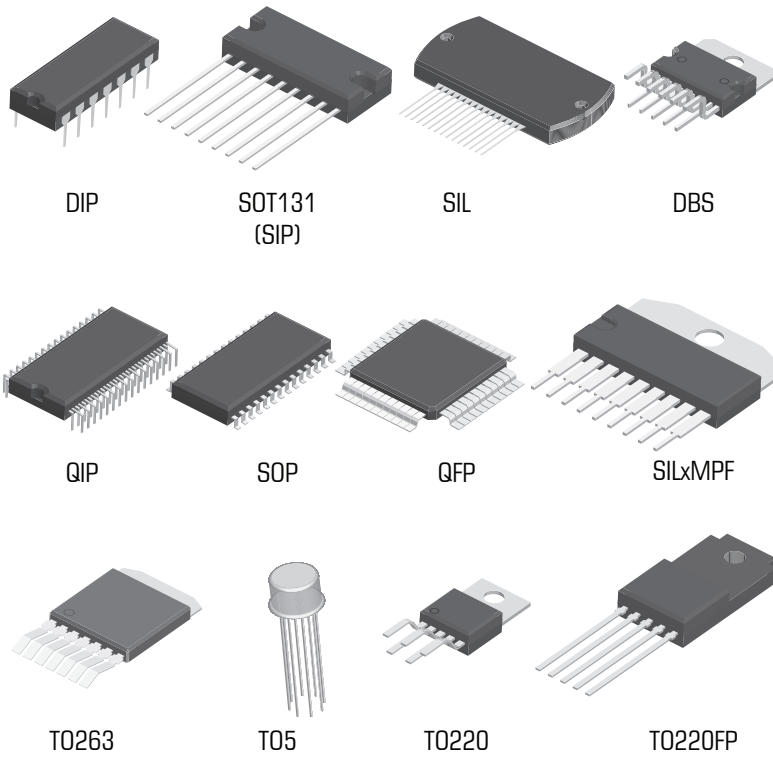


Figura 30.2: Encapsulamentos mais comuns usados em circuitos integrados.

O número de terminais vai depender do modelo do circuito integrado.

Os nomes dos encapsulamentos que não seguem o padrão "TO" ou "SOT" são nomes "genéricos":

- **DIP (Dual In Parallel):** Também chamado DIL (Dual In-Line package), é o nome dado a qualquer encapsulamento que tenha duas colunas de terminais paralelos. Pode ser seguido do número de pinos existentes, por exemplo DIP-16P para um componente com 16 pinos (o hífen e a letra P são frequentemente omitidos). Pode ser precedido por uma letra indicando o tipo do material, por exemplo CDIP para encapsulamento cerâmico e PDIP para encapsulamento plástico.
- **SIL (Single In-Line package):** Também chamado SIP (Single In Parallel), é o nome dado a qualquer encapsulamento que tenha seus terminais arranjados em apenas uma única linha reta. Pode ser seguido do número de pinos existentes, por exemplo SIL-9P para um componente com nove pinos (o hífen e a letra P são frequentemente omitidos).
- **DBS (DIL Bent SIL):** Nome dado a qualquer encapsulamento onde os terminais saiam do circuito integrados em uma única linha reta (SIP), mas são dobrados de forma a serem soldados na placa de circuito impresso do aparelho em duas linhas paralelas (DIB). Pode ser seguido do número de pinos existentes, por exemplo DBS-9P para um componente com nove pinos (o hífen e a letra P são frequentemente omitidos).
- **QIP (Quad In-line Package):** Também chamado QIL (Quad In-Line package), é um circuito integrado com encapsulamento DIP onde seus terminais são dobrados de modo a formar duas linhas de terminais de cada lado do componente, para um total de quatro linhas. Pode ser seguido do número de pinos existentes.
- **MPF (Medium Power package with Fin):** Encapsulamento do tipo SIL (SILxMPF) ou DBS (DBSxMPF) com dissipador de calor anexado, usado por circuitos integrados de média potência. O valor x indica a quantidade de pinos, por exemplo, SIL9MPF para um circuito integrado de nove pinos.
- **SOP (Small Outline Package):** Nome genérico para qualquer encapsulamento do tipo DIP de tamanho reduzido, podendo ser chamado por outros nomes como SO (Small Outline) ou SOIC (Small Outline Integrated Circuit). Assim como ocorre com os demais encapsulamentos listados, pode ser seguido do número de terminais do componente. Existem diversas subdivisões, dependendo do tamanho do circuito integrado. Por exemplo, TSOP (Thin SOP), MSOP (Micro SOP), SSOP (Shrink SOP), entre outras.
- **QFP (Quad Flat Package):** Nome genérico para qualquer encapsulamento quadrado com terminais saindo dos quatro lados do circuito integrado. Possui diversas subdivisões dependendo do material ou tamanho do encapsulamento, por exemplo PQFP (Plastic QFP), TQFP (Thin QFP), LQFP (Low profile QFP), entre outras.

Note que há circuitos integrados, especialmente reguladores de tensão, que podem ser encontrados com o encapsulamento TO220 de três pinos, que é o mesmo tipo usado por transistores, tiristores e retificadores Schottky. Daí a importância de não assumir que qualquer dispositivo com três terminais será sempre um transistor.

Embora o material mais usado em encapsulamento de circuitos integrados seja o plástico preto, circuitos integrados podem ser também encapsulados em cerâmica (normalmente branca ou cinza).

Em relação à pinagem do circuito integrado, a função de cada pino estará descrita em seu *data sheet*. De qualquer forma, você deverá saber identificar a numeração de cada pino. Todo circuito integrado possui uma marcação de "pino 1", que justamente indica qual é o pino número 1 do componente. A partir daí os pinos seguirão em contagem sequencial. No caso de circuitos integrados com pinos dispostos em uma linha reta somente em um dos seus lados (encapsulamentos SIL, DBS, TO263 e TO220), basta colocar o lado contendo o nome do circuito integrado para cima (ou seja, o lado contendo o dissipador de calor, caso existente, para baixo); o pino um será o primeiro pino da esquerda. De qualquer forma, haverá um chanfrado, listra ou bolinha indicando o pino 1.

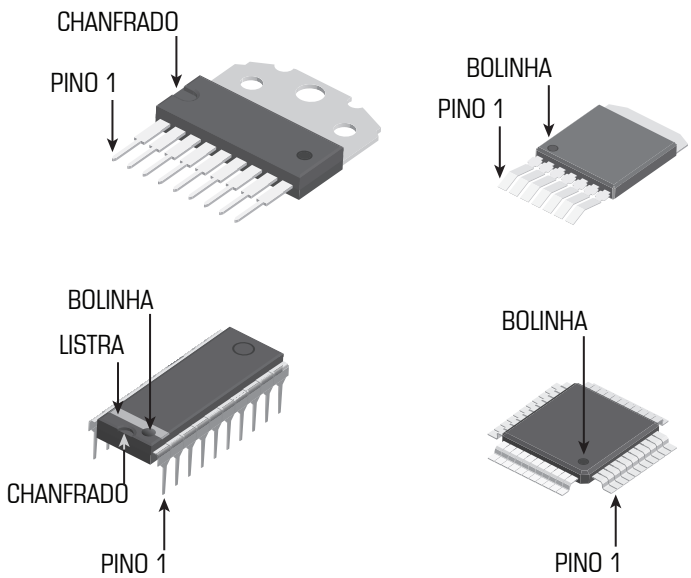


Figura 30.3: Pinagem de circuitos integrados.

Já no caso de circuitos integrados com pinos dispostos em mais de um lado do encapsulamento, você deve procurar um chanfrado, uma listra ou uma bolinha no circuito. Tendo encontrado esta marcação, gire o circuito integrado para que esta marcação fique à sua esquerda. O pino 1 será aquele abaixo e mais à esquerda da marcação de pino 1 existente. Na Figura 30.3 damos alguns exemplos. A partir daí, a contagem procede-se sequencialmente em sentido anti-horário.

Nomenclatura

Circuitos integrados trazem um código estampado em seu encapsulamento. Assim como ocorre com transistores, o código ou "nome" do circuito integrado é um conjunto de letras e números que não trazem sua função codificada. Tradução: a não ser que você já tenha memorizado a função de um determinado circuito integrado, terá de procurar pelo seu *data sheet* na Internet para saber a sua função e a disposição de seus terminais, isto é, o que cada uma de suas "pernas" faz.

Normalmente além do "nome" do circuito integrado, haverá uma série de números e letras indicando informações complementares, tais como número do lote, data de fabricação, fábrica de origem etc. Quase sempre o circuito integrado trará também a logomarca de seu fabricante, o que facilitará a pesquisa pelo seu *data sheet*, desde que você saiba qual é a marca que responde à logomarca presente no chip (em http://how-to.wikia.com/wiki/Howto_identify_integrated_circuit_(chip)_manufacturers_by_their_logos há um extenso banco de dados contendo a logomarca da maioria dos fabricantes de dispositivos semicondutores).

É importante notar que, assim como ocorre com transistores, alguns fabricantes podem imprimir apenas parte do nome do chip, em vez de seu nome completo, especialmente nos modelos de menor tamanho físico.

Circuitos integrados podem ser exclusivos de um determinado fabricante (muitas vezes também chamados "dedicados"), significando que somente um determinado fabricante o produz, ou podem ser de uso geral, significando que vários fabricantes produzem o mesmo circuito integrado, gerando uma sadia competição no mercado. Por existirem vários fabricantes produzindo o mesmo chip, esses circuitos integrados são fáceis de serem encontrados no mercado.

No caso dos circuitos integrados de uso geral, que são os que estaremos usando em nossos exemplos neste capítulo, os diversos fabricantes têm de usar o mesmo nome para facilitar, mas eles normalmente adicionam um código de duas ou mais letras antes do nome do circuito integrado.

Para um exemplo real, considere o circuito integrado 555. Este é o nome "genérico" dele, e ele será encontrado por diversos nomes, tais como LM555, NE555, SA555 etc. O mesmo acontece com o circuito integrado 741, que é encontrado com nomes como LM741, μa741, SA741 etc.

Circuitos integrados estão disponíveis em duas séries, civil e militar. A série civil é a que você compra em lojas de componentes eletrônicos e é a que é encontrada dentro de aparelhos eletrônicos "comuns". Componentes de série militar, também chamados de "componentes de precisão", são mais caros, porém possuem tolerância mais apertada e podem operar em uma maior faixa de temperatura ambiente, sendo o tipo de componente usado em equipamentos militares ou mesmo em equipamentos civis onde essas características são importantes (por exemplo, equipamentos hospitalares).

Simbologia

Em diagramas esquemáticos, a simbologia de circuitos integrados variará de acordo com o seu tipo. Por exemplo, com circuitos integrados amplificadores operacionais será usado o símbolo de amplificador operacional (ver Figura 30.5), normalmente adicionando-se perto de cada entrada ou saída do circuito o número do terminal que representa aquela entrada ou saída no circuito integrado. Com circuitos integrados que tenham portas lógicas em seu interior (não abordados neste livro), serão usados os símbolos da porta lógica que ele possui em seu interior, novamente colocando o número do terminal que representa cada entrada ou saída ao lado de cada entrada ou saída.

Em alguns casos, circuitos integrados são representados simplesmente por um retângulo com terminais, sendo uma representação direta dos terminais do circuito integrado. Por exemplo, se o circuito integrado tiver 14 pinos, será representado como um retângulo com 14 terminais (sete de cada lado). Este tipo de representação deve ser evitada: idealmente devemos representar o circuito integrado com o símbolo do circuito que ele possui em seu interior.

Testando Circuitos Integrados

Para um correto teste de um circuito integrado você deverá ter em mãos o seu *data sheet* e, normalmente, um osciloscópio (se o circuito integrado for um regulador de tensão, basta usar um multímetro). Com o circuito onde o chip está inserido ligado e operacional, você deverá com o osciloscópio verificar o que há na entrada e na saída do circuito integrado. O teste é simples. Se há um sinal em sua entrada mas o sinal esperado em sua saída não existe ou não corresponde ao esperado, o circuito está defeituoso. É claro que se não houver sinal na entrada, significa que o problema não está no circuito integrado, mas sim em outra parte do aparelho. Por exemplo, se você estiver testando um amplificador e não houver sinal na entrada, significa que o problema está no circuito anterior ou você se esqueceu de conectar o amplificador a um sinal de áudio,

ou pode ser um problema ainda de fio partido. Você deverá também verificar se o circuito integrado está alimentado corretamente.

Se você não dispuser de um osciloscópio, há algumas dicas de como testar circuitos integrados. Com o aparelho desligado e "frio", encoste um dedo sobre o circuito integrado suspeito. Preste atenção para não encostar seu dedo em nenhum terminal ou parte metálica. Continue com o dedo sobre o circuito e ligue o aparelho. Se a temperatura sobre o circuito subir rapidamente a ponto de você ter de imediatamente tirar o seu dedo, possivelmente significa que o circuito integrado está queimado.

Outra forma de teste é usando um multímetro na escala de resistência (escala de resistência comum e não na escala de teste de diodo). Com o aparelho desligado e com o circuito integrado preferencialmente fora do circuito, coloque uma das ponteiras no pino que é o terra (GND) do circuito integrado, e faça uma "varredura" pelos demais pinos do circuito integrado com a outra ponteira. Em nenhum momento o multímetro deverá marcar resistência zero. Caso isso ocorra, o circuito integrado está queimado.

Esses dois testes práticos são, no entanto, incompletos, pois o circuito pode estar defeituoso e, mesmo assim, "passar" nesses dois testes.

Amplificadores Operacionais

Amplificadores operacionais – também chamados amp ops (ou op amp, em inglês) –, como o nome sugere, são circuitos amplificadores. De todos os circuitos integrados lineares existentes, o amplificador operacional é o mais famoso e mais usado e, portanto, o mais importante de estudarmos. Daí a necessidade de nos aprofundarmos no estudo desse tipo de circuito.

Um amplificador operacional ideal tem uma impedância de entrada infinita, uma impedância de saída zero e um ganho de tensão (A_V) infinito. Obviamente na prática essas condições são impossíveis de serem alcançadas, mas você deve ter entendido a ideia.

Fisicamente falando, a principal característica de um amplificador operacional é possuir duas entradas, uma entrada não inversora e uma entrada inversora (que inverte a fase do sinal, similarmente ao que ocorre a transistores na configuração de emissor comum).

Embora seja teoricamente possível construir um amplificador operacional usando transistores, como mostramos na Figura 30.4, é muito mais prático usar um circuito integrado com este circuito já pronto.

Na Figura 30.5 vemos o símbolo do amplificador operacional. Nele, o símbolo "-" indica a entrada inversora e o símbolo "+" indica a entrada não inversora.

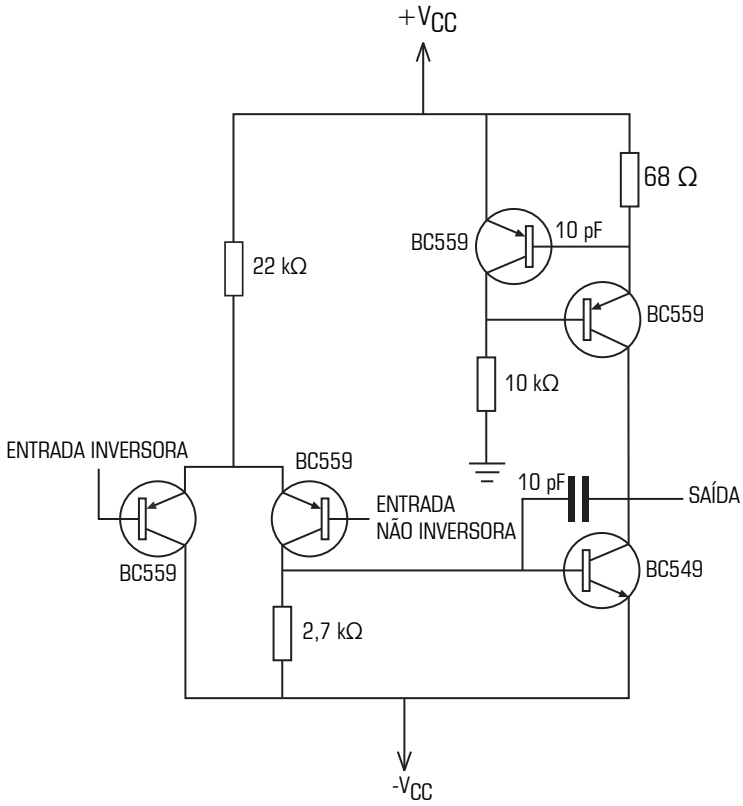


Figura 30.4: Amplificador operacional com componentes discretos.

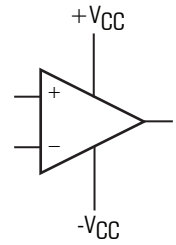


Figura 30.5: Simbologia do amplificador operacional.

Alimentação

Amplificadores operacionais precisam ser alimentados tanto por uma tensão positiva ($+V_{CC}$) quanto por uma tensão negativa ($-V_{CC}$). Alguns circuitos integrados amplificadores operacionais possuem ainda uma entrada chamada *offset*, usada para regular o nível CC presente na saída do amplificador, isto é, o nível de tensão contínua sobre a qual a saída alternada flutuará.

O limite de amplificação de um amplificador operacional é dado por sua alimentação, da mesma forma que ocorre com transistores. Podemos considerar esse limite como sendo de 1,4 V menor que o valor da alimentação do circuito (esse valor equivale a duas quedas de tensão provocadas por junções PN). Assim, um amplificador operacional alimentado com + 12 V e - 12 V amplificará o sinal de entrada até um limite máximo de 10,6 V para o semiciclo positivo e - 10,6 V para o semiciclo negativo (21,2 Vpp). Qualquer tentativa de amplificação acima desses níveis irá fazer com que os picos do sinal que ultrapassem esses valores sejam cortados, isto é, apareçam na saída como fixos em 10,6 V ou - 10,6 V, como exemplificamos na Figura 30.6.

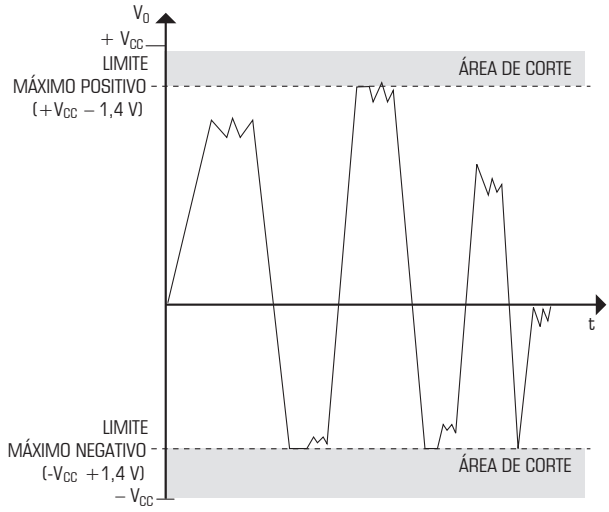


Figura 30.6: O amplificador operacional corta valores acima de seus limites.

A alimentação positiva é responsável pela amplificação do semiciclo positivo da forma de onda da entrada, assim como a alimentação negativa é responsável pela amplificação do semiciclo negativo da forma de onda da entrada. Eventualmente você poderá encontrar circuitos onde a alimentação negativa ($-V_{CC}$) do amplificador operacional é simplesmente aterrada. Nesses casos,

ocorrerá que o limite de amplificação negativa será substancialmente limitado. Por exemplo, alimentar um amplificador operacional com + 12 V e aterrar sua alimentação negativa fará com que ele amplifique o sinal de entrada somente na faixa de 10,6 V a 1,4 V. Qualquer valor que na saída tivesse que ser abaixo de 1,4 V será apresentado na saída como sendo 1,4 V. Em alguns casos, no entanto, essa limitação talvez não atrapalhe e essa configuração eventualmente pode ser usada.

Configurações

Como vimos, o ganho de um amplificador operacional ideal é infinito. Só para você ter uma ideia de como o ganho de um amplificador operacional é realmente muito alto, basta observarmos que o ganho de tensão mínimo do circuito integrado LM324 é de 25.000. Ou seja, em teoria, se inserirmos um sinal com 100 mV de pico a pico na entrada desse circuito, teríamos, no mínimo, 2.500 Vpp na saída do amplificador. Como possivelmente não iremos usar uma fonte de alimentação simétrica de 2.500 V (até porque esse circuito integrado literalmente explodiria se conectado a tal fonte), o circuito cortará a forma de onda para os limites que acabamos de explicar, perdendo o sentido usar um circuito desse tipo.

Por isso, na prática usamos resistores em conjunto com o amplificador operacional para limitar o seu ganho. Com isso, podemos montar um circuito amplificador com o ganho que quisermos.

A seguir veremos as configurações mais comuns que podemos montar com amplificadores operacionais, suas aplicações e os cálculos envolvidos.

Amplificador Não Inversor

A configuração do amplificador não inversor é vista na Figura 30.7. Como você pode supor pelo nome, não há inversão de fase na saída em relação ao sinal aplicado na entrada.

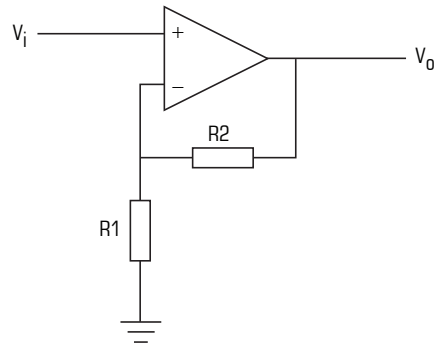


Figura 30.7: Amplificador não inversor.

Para a configuração de amplificador não inversor, o ganho de tensão será dado por:

$$A_V = \frac{V_0}{V_t} = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (30.1)$$

Dessa forma, a escolha dos valores de R1 e R2 deve ser feita de acordo com o ganho pretendido.

O amplificador não inversor apresenta alta impedância de entrada, de pelo menos 10 MΩ. Esta configuração é a melhor escolha caso você precise de uma alta impedância de entrada.

Amplificador Inversor

Já o amplificador inversor inverte o sinal em 180º na saída. Essa configuração pode ser vista na Figura 30.8

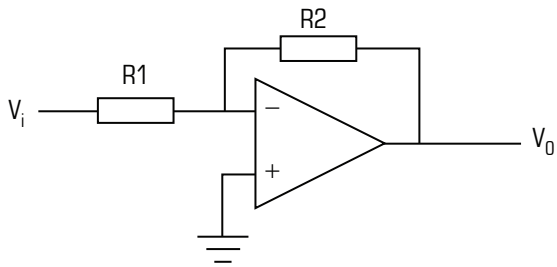


Figura 30.8: Amplificador inversor.

O ganho de tensão do amplificador inversor é dado por (o sinal de menos apenas indica que há inversão de fase):

$$A_V = \frac{V_0}{V_I} = -\frac{R2}{R1} \quad (30.2)$$

A impedância de entrada do amplificador inversor é dada pelo valor de R1 e, por isso, devemos usar um resistor de valor alto, pois idealmente amplificadores precisam ter alta impedância de entrada. No entanto, dependendo do ganho pretendido, você verá que, para manter o valor de R2 dentro da faixa comercial de resistores, o valor de R1 não será alto o suficiente, gerando um amplificador com relativa baixa impedância de entrada.

Um circuito alternativo para o amplificador inversor é apresentada na Figura 30.9. Neste circuito a impedância de entrada continua sendo dada pelo valor de R1, mas a fórmula para o cálculo de ganho é diferente, permitindo que o valor de R1 seja maior para um mesmo ganho.

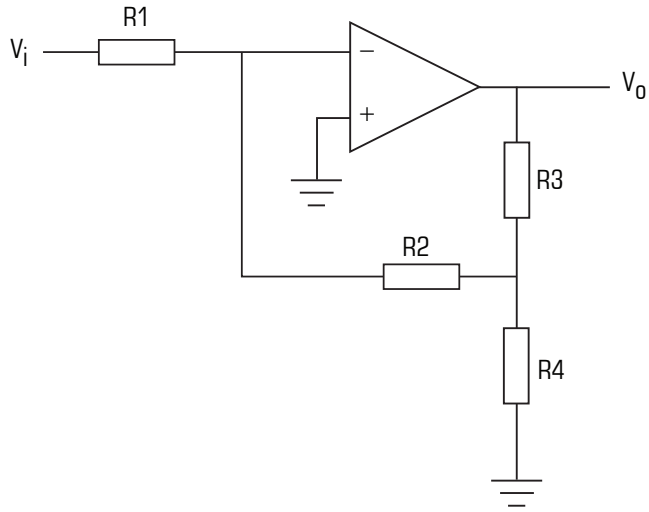


Figura 30.9: Amplificador inversor (maior impedância de entrada).

Neste caso, o ganho de tensão será dado por:

$$A_V = -R2 \cdot \frac{R3 + R4}{R1 \cdot R4} \tag{30.3}$$

Seguidor de Sinal

A configuração de seguidor de sinal serve como um circuito isolador, também chamado *buffer*. Nele, a impedância de entrada do circuito será extremamente alta (maior que 10 MΩ) e a impedância de saída será extremamente baixa (menor que 1 Ω). O ganho de tensão será de 1, isto é, o sinal na saída do circuito será idêntico ao sinal presente na entrada do circuito.

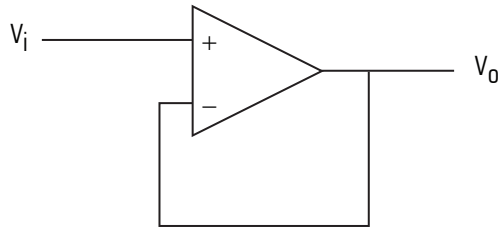


Figura 30.10: Seguidor de sinal.

Amplificador Diferencial

Já a configuração de amplificador diferencial é muito interessante. Um amplificador diferencial é um amplificador que amplifica somente a diferença entre dois sinais de entrada. Assim, na saída desse amplificador teremos amplificada a diferença existente entre os sinais V_{i1} e V_{i2}.

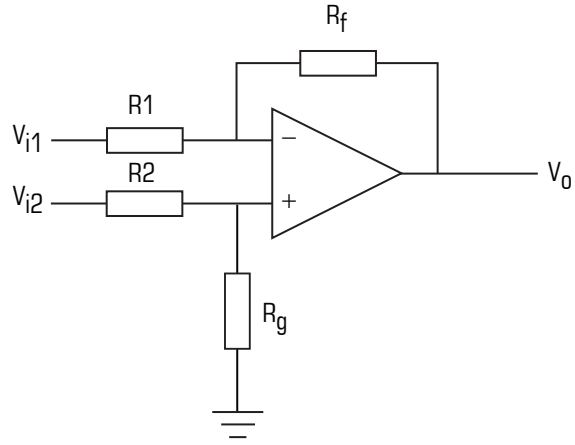


Figura 30.11: Amplificador diferencial.

A equação do amplificador diferencial é:

$$V_0 = \left(\frac{R_g}{R_g + R2} \cdot \frac{R_f + R1}{R1} \cdot V_{i2} \right) - \left(\frac{R_f}{R1} \cdot V_{i1} \right) \quad (30.4)$$

Quando $R_f / R1 = R_g / R2$, podemos simplificar a equação para:

$$V_0 = (V_{i2} - V_{i1}) \cdot \frac{R_f}{R1} \quad (30.5)$$

Neste caso, o ganho de tensão será dado por:

$$A_v = \frac{V_0}{V_{i2} - V_{i1}} = \frac{R_f}{R1} \quad (30.6)$$

Quando $R1 = R_f$ e $R2 = R_g$, o ganho é igual a um, e o circuito funciona como sendo um seguidor diferencial, isto é:

$$V_o = V_{i2} - V_{i1} \quad (30.7)$$

Somador

Outra configuração bastante usual do amplificador operacional é como um somador de tensão, que ilustramos na Figura 30.12. Na saída do amplificador teremos como forma de onda final à soma de todas as entradas.

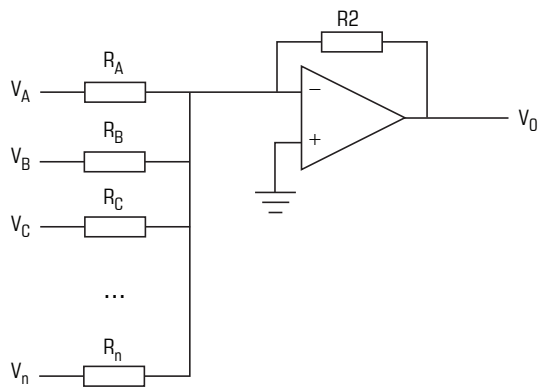


Figura 30.12: Somador de tensão.

Repare que o somador de tensão nada mais é do que o amplificador inversor que estudamos anteriormente. Com isso, o ganho de cada entrada é calculado de acordo com a equação já apresentada.

Como cada entrada usa um resistor separado, podemos definir ganhos diferentes para cada entrada usada na soma. Com isso, podemos definir diferentes "pesos" para cada entrada. Uma entrada cujo ganho seja 100 terá um peso 10 vezes maior na saída do amplificador do que uma entrada cujo ganho seja 10, por exemplo. Obviamente, se forem usados todos os resistores com um mesmo valor, todas as entradas terão o mesmo peso.

Assim, temos que:

$$V_0 = -R2 \cdot \left(\frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B} + \frac{V_C}{R_C} + ... + \frac{V_n}{R_n}\right) \quad (30.8)$$

Se neste circuito $R_A = R_B = R_C = ... = R_n$, mas for R2 diferente, então:

$$V_0 = -\frac{R2}{R_A} \cdot \left(V_A + V_B + V_C + ... V_n\right) \quad (30.9)$$

Se todos os resistores tiverem o mesmo valor, incluindo R2, então:

$$V_0 = -\left(V_A + V_B + V_C + ... V_n\right) \quad (30.10)$$

Outras Configurações

Há ainda inúmeros outros usos que podem ser dados a amplificadores operacionais. Veremos vários nos Capítulos 33 e 34.

O Circuito Integrado 741

Como já comentamos, seria impossível descrevermos todos os amplificadores operacionais comerciais existentes no mercado. Entretanto, há um circuito em particular que você precisa conhecer, chamado 741 (LM741, NE741, μA741 etc. – as letras dependem do fabricante), que é hiperfamoso e extremamente utilizado no dia a dia. Na Figura 30.13 nós vemos a pinagem desse circuito.

Figura 30.13: Pinagem do circuito integrado 741.

Como você pode reparar, o circuito é exatamente igual ao amplificador operacional padrão que explicamos, com a diferença de possuir duas entradas para o ajuste de *offset* (isto é, nível de tensão CC que haverá na saída do amplificador). Se você quiser montar um amplificador com esse ajuste, basta ligar as extremidades de um potenciômetro de 10 kΩ nas entradas rotuladas offset e o cursor central do potenciômetro em $-V_{CC}$. O pino marcado com NC significa Não Conectado e não é usado.

Os demais circuitos integrados amplificadores operacionais não são muito diferentes do 741. Por exemplo, o LM324 é um circuito integrado de 14 terminais contendo quatro amplificadores operacionais independentes dentro dele.

Temporizadores

Circuitos temporizadores ou *multivibradores* são circuitos que geram um sinal com uma duração predeterminada. Há basicamente dois tipos de multivibradores:

- **Multivibrador astável:** Este tipo de circuito gera infinitamente uma forma de onda com temporização predeterminada. Por exemplo, um gerador de forma de onda quadrada que gere uma forma de onda com frequência de 1 kHz. Quando esse circuito é ligado ele começa a gerar essa forma de onda e não para mais, só parando quando o circuito for desligado. Se você ligar um LED na saída de um multivibrador astável, ele ficará piscando indefinidamente na frequência determinada em sua construção.
- **Multivibrador monoestável:** Este tipo de circuito gera um pulso de comprimento fixo a partir de um sinal (chamado gatilho ou *trigger*) aplicado em sua entrada. O importante nesse tipo de circuito é que, independentemente do tempo de duração do gatilho, a du-

ração da forma de onda na saída será sempre a mesma. Se você ligar um LED na saída de um multivibrador monoestável, ele se acenderá somente quando for dado um pulso na entrada de gatilho do multivibrador e ficará aceso somente durante o período que foi definido na construção do multivibrador.

O Circuito Integrado 555

Existem vários circuitos integrados temporizadores, mas o mais famoso e que você precisa conhecer é o 555 (LM555, NE555 etc. – as letras dependem do fabricante). Vemos a pinagem do 555 na Figura 30.14.

Figura 30.14: Pinagem do circuito integrado 555.

Multivibrador Astável com o 555

Construir um multivibrador astável com um 555 é extremamente simples e vemos esse circuito na Figura 30.15. Nesse circuito, o gatilho (*trigger*) do 555 é realimentado pelo próprio circuito, fazendo com que ele gere uma forma de onda quadrada em sua saída indefinidamente. A alimentação do circuito (V_{CC}) poderá ser entre 5 V e 15 V.

A frequência da forma de onda na saída do circuito será dada pelo valor dos resistores e do capacitor. Isto é, os valores dos resistores e do capacitor são definidos de acordo com a frequência pretendida para a forma de onda quadrada que será obtida na saída do circuito. A forma de onda na saída será quadrada, podendo assumir dois valores, zero volt ou $+V_{CC}$.

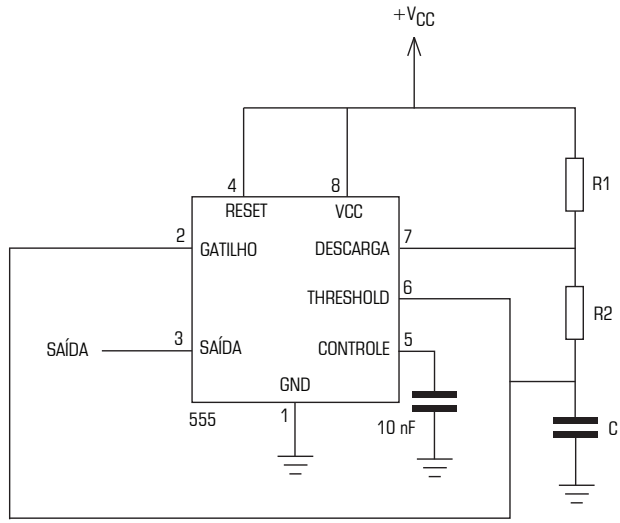


Figura 30.15: Circuito integrado 555 usado como multivibrador astável.

Você pode ainda definir o ciclo de carga do sinal na saída, isto é, o período em que ele fica baixo (t_0) e o período em que ele fica alto (t_1). O período total será dado, portanto, por $t_0 + t_1$ – ver Figura 30.16. No circuito apresentado, o ciclo de carga tem de ser pelo menos 50%, ou seja, t1 ≥ t0.

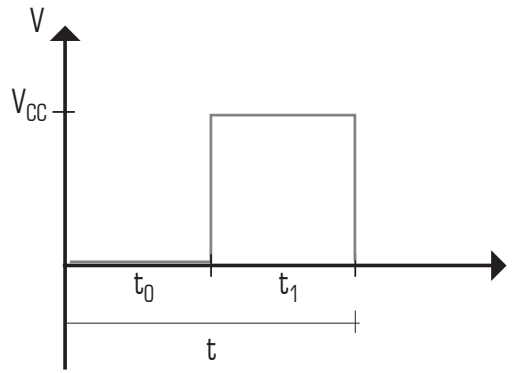


Figura 30.16: Temporização do multivibrador astável.

As fórmulas para o multivibrador astável usando o 555 são as seguintes:

$$t_o = 0,693 \cdot C \cdot R2 \quad (30.11)$$

$$t_1 = 0,693 \cdot C \cdot (R1 + R2) \quad (30.12)$$

$$t = t_0 + t_1 \quad (30.13)$$

A frequência do sinal será obviamente o inverso do período (f = 1 / t).

Você pode trocar R2 por um potenciômetro, de forma que você possa variar manualmente a frequência de oscilação do multivibrador. Com isso, você pode criar um gerador de onda quadrada com frequência variável.

Multivibrador Monoestável com o 555

O uso do 555 como multivibrador monoestável também é bastante simples. Nele, basta aplicarmos um pulso de qualquer duração no gatilho do 555 para que em sua saída tenhamos um pulso com uma duração preestabelecida. Na Figura 30.17 vemos o circuito a ser usado.

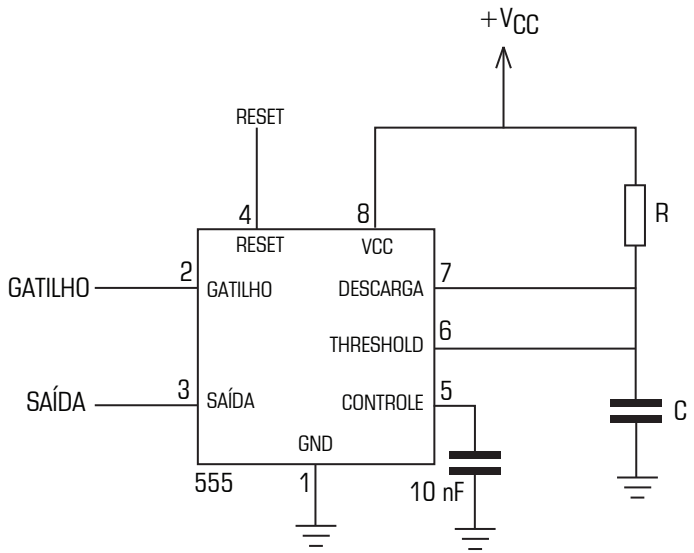


Figura 30.17: Circuito integrado 555 usado como multivibrador monoestável.

A duração do pulso de saída é definida através dos valores do capacitor e do resistor usado no circuito, através da fórmula:

$$t = 1{,}1 \cdot R \cdot C \qquad (30.14)$$

O 555, como comentamos anteriormente, deverá ser alimentado com uma tensão entre 5 e 15 V. A tensão na saída do 555, quando ela estiver ativada, terá o mesmo valor de V_{CC}.

Reguladores de Tensão

Um regulador de tensão é um circuito capaz de pegar uma determinada tensão CC e "transformá-la" em uma tensão mais baixa. Por exemplo, pegar 20 V_{CC} e "transformar" essa tensão em 5 V_{CC}. A "mágica" é feita através de dissipação térmica, isto é, o circuito regulador de tensão transforma em calor a tensão em excesso.

Até agora vimos duas formas de se construir um circuito regulador de tensão: através de um diodo Zener (ver Capítulo 27) ou através de um transistor de potência, usando um diodo Zener como referência (ver Capítulo 29). Existem, no entanto, circuitos integrados reguladores de tensão. A grande vantagem desses circuitos sobre o diodo Zener é a potência máxima admitida, ou seja, a corrente máxima suportada. Os reguladores de tensão da família 78xx e 79xx, que são os mais famosos circuito integrados reguladores de tensão, suportam uma corrente máxima de 1 A, sendo um substituto perfeito para o diodo Zener na regulagem de tensão na maioria das fontes de alimentação lineares, sendo mais barato do que o uso de um transistor de potência. Obviamente, se o circuito consumir mais do que 1 A, você deverá considerar o uso de um circuito integrado regulador de tensão mais potente, colocar dois ou mais reguladores de tensão em paralelo ou então montar um circuito regulador de tensão usando um transistor de potência – usando, por exemplo, o famoso transistor 2N3055, que suporta uma corrente máxima de 15 A.

Assim como ocorre com os circuitos integrados 555 e 741, circuitos integrados reguladores de tensão possuem duas letras antes de seus nomes, como LM (ex.: LM7812).

Os reguladores da série 78xx e 79xx são especificados de acordo com a sua tensão de regulação. Por exemplo, o circuito 7805 é um regulador de +5 V, enquanto que o circuito 7812 é um circuito regulador de +12 V. Já os circuitos da série 79xx são reguladores negativos, isto é, um 7905 regula a tensão em -5V e um 7912 regula a tensão em -12 V. Na Figura 30.18 vemos a pinagem dos reguladores 78xx e 79xx. Note que a pinagem é diferente entre esses dois reguladores e você deverá tomar cuidado com isso.

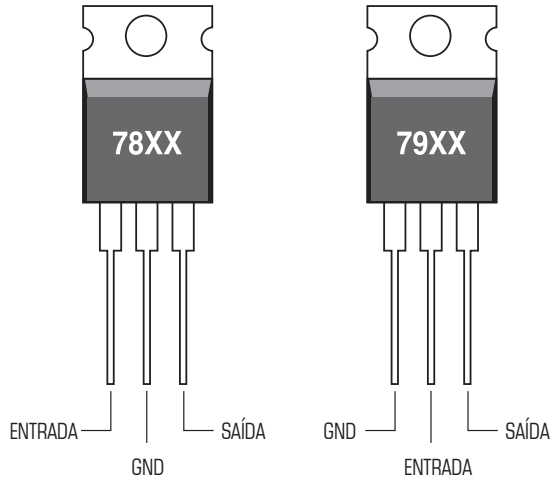


Figura 30.18: Pinagem dos reguladores 78xx e 79xx.

Na Figura 30.19 vemos o circuito básico de um regulador de tensão usando circuitos integrados reguladores de tensão. Esse tipo de circuito é válido para qualquer circuito integrado regulador. O capacitor colocado na entrada só é necessário caso o regulador não seja usado dentro de uma fonte de alimentação linear. O capacitor colocado na saída também é opcional, porém recomendado.

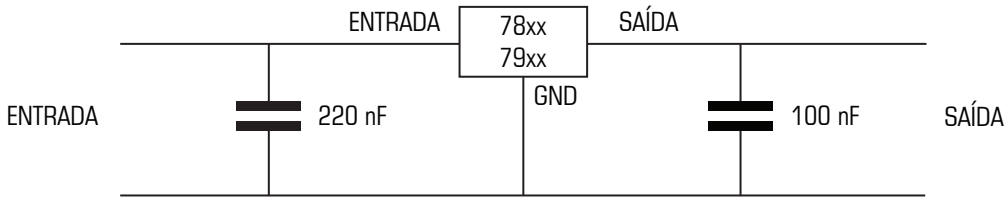


Figura 30.19: Circuito básico de um regulador de tensão.

Optoisoladores

Optoisoladores são circuitos usados para isolar duas partes de um mesmo circuito ou então para converter o padrão de tensão usado por circuitos digitais. Ele consiste em um LED e um

fototransistor um de frente para o outro e presos em um único encapsulamento. Para que o funcionamento desse tipo de circuito fique mais claro, na Figura 30.20 vemos a pinagem e a estrutura interna do circuito integrado 4N25.

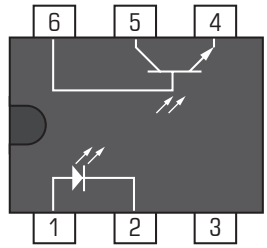


Figura 30.20: Pinagem do circuito integrado 4N25.

Esse circuito, como dissemos, pode ser usado para converter dois padrões de tensão. Por exemplo, o LED pode ser alimentado com pulsos de 12 V e o fototransistor pode ser alimentado com 5 V, fazendo com que no coletor do fototransistor tenhamos os mesmos pulsos emitidos pelo LED, porém a uma amplitude de 5 V e não mais a 12 V.

Contador de Década

Este livro é sobre eletrônica linear (também chamada eletrônica analógica) e, em teoria, não estaríamos abordando circuitos integrados digitais. No entanto, existe um circuito integrado digital tão famoso e tão usado mesmo na eletrônica linear que não poderíamos deixar de explicar o seu funcionamento. Trata-se do circuito integrado 4017.

O 4017 é um contador de década, isto é, ele possui 10 saídas e envia um pulso para cada uma dessas saídas em sequência. O tempo em que cada uma das saídas ficará ativa e o tempo em que demorará para o contador mover da saída atual para a próxima é controlado através de uma entrada chamada *clock* do circuito integrado. Podemos conectar um multivibrador astável nesta entrada (como o circuito da Figura 30.15) e cada saída do 4017 será ativada pelo período definido no multivibrador.

Existem inúmeras aplicações interessantíssimas para esse circuito. Você pode, por exemplo, ligar dez lâmpadas, uma em cada saída (obviamente através de relés ou TRIACs), fazendo assim um sequencial, configurando a velocidade em que as lâmpadas acenderão através do circuito baseado no 555. Esse tipo de circuito é clássico e muito usado em letreiros luminosos e na iluminação de casas noturnas. O mais interessante é que você não precisa usar as 10 saídas; você pode configurar o 4017

para contar somente até a saída quatro, por exemplo, formando, assim, um sequencial de quatro canais, isto é, ligando somente quatro grupos de lâmpadas em vez de 10. Repare também que falamos em grupos de lâmpadas. Você pode ligar lâmpadas em paralelo na mesma saída, para que elas sejam acesas ao mesmo tempo. Se você reparar letreiros luminosos na rua, verá que mais de uma lâmpada se acende ao mesmo tempo. Isso cria o efeito da luz "andando".

Na Figura 30.21 nós damos um exemplo prático do uso de um sequencial. O primeiro exemplo é um sequencial de 10 canais com uma lâmpada ligada em cada canal. Já no segundo exemplo, mostramos um sequencial de apenas quatro canais, mas com cinco lâmpadas ligadas em paralelo em cada canal. Como as lâmpadas foram colocadas fisicamente na forma de um retângulo, isso gera uma ideia de luzes "andando".

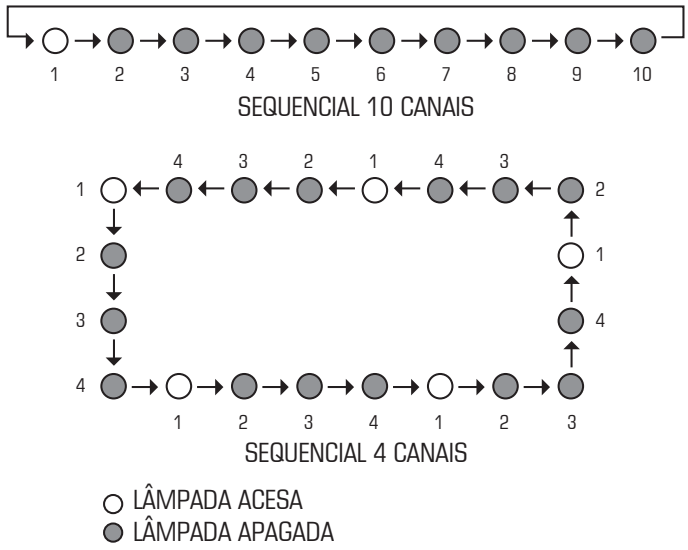


Figura 30.21: Exemplo de sequencial de lâmpadas.

Em casas noturnas, por exemplo, o sequencial pode ser ligado em lâmpadas ligadas distantes entre si, pois nesse caso o efeito que quer ser dado não é o mesmo de um letreiro luminoso.

Na Figura 30.22 nós vemos a pinagem do circuito integrado 4017, que pode ser alimentado com qualquer tensão entre 3 V e 15 V, o que o torna um circuito integrado extremamente versátil.

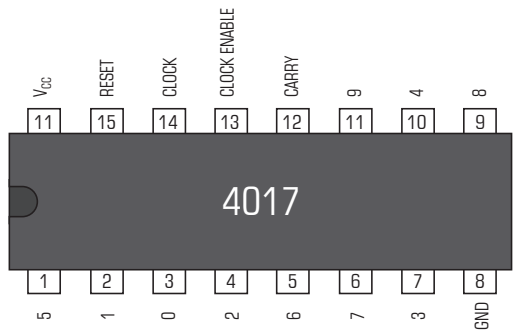


Figura 30.22: Pinagem do circuito integrado 4017.

Construir um sequencial com o 4017 é muito fácil. Na Figura 30.23 vemos o circuito completo de um sequencial, já com o multivibrador astável. Através do potenciômetro do multivibrador podemos controlar a velocidade com que as saídas do 4017 são ativadas.

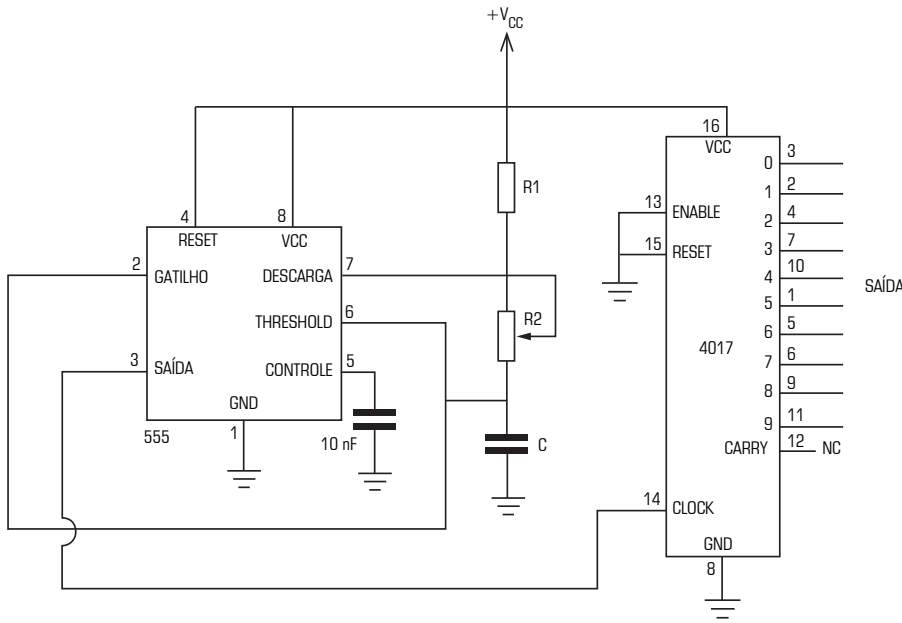


Figura 30.23: Circuito sequencial usando um 4017 e um 555.

Você pode ligar LEDs diretamente às saídas do 4017, usando um resistor. Se você quiser controlar lâmpadas incandescentes na saída do 4017, deverá ligar um transistor como chave ativando um relé. Mostramos essas duas possibilidades na Figura 30.24.

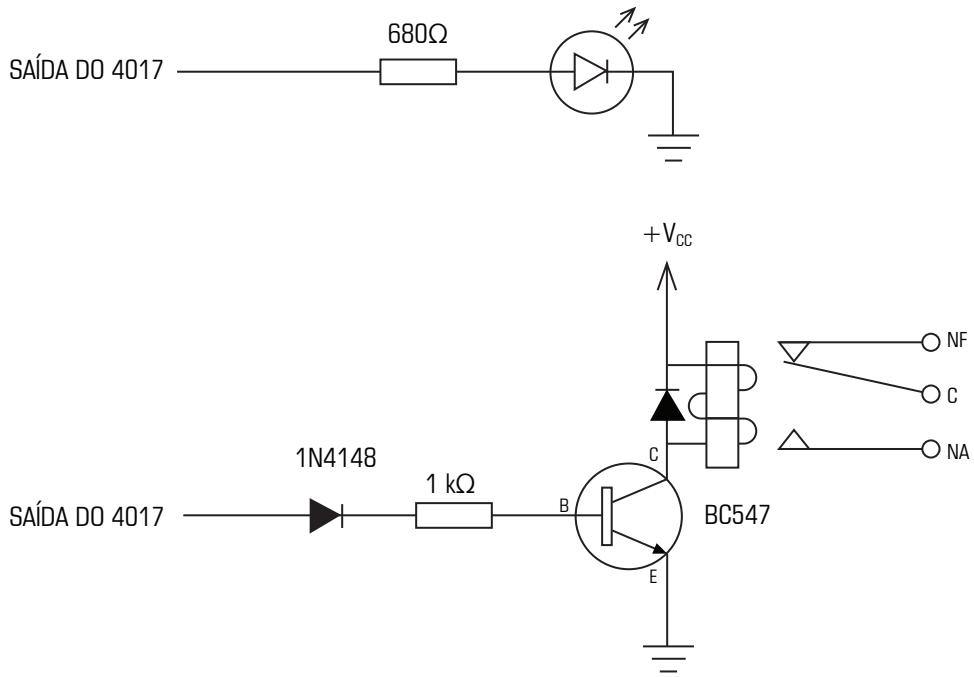


Figura 30.24: Exemplos de uso.

O grande macete desse circuito é o pino 15 do 4017, reset. Se você for usar as 10 saídas deste circuito integrado, então deverá aterrar essa saída. Se você for usar menos do que 10 saídas, deverá ligar o pino de reset não ao terra, mas sim à primeira saída que não for usada. Por exemplo, se você for criar um sequencial de quatro canais, somente as saídas 0, 1, 2 e 3 serão usadas. Com isso, ligue o pino de reset à saída 4 do 4017. Isso fará com que, quando o 4017 ativar a sua saída 4, a contagem seja reiniciada, voltando para a saída 0, em vez de a contagem seguir adiante pelas saídas não utilizadas.

Exercícios

1. Qual é o ganho do circuito da Figura 30.8 supondo que R1 = 10 kΩ e R2 = 1 MΩ?
2. Qual é a impedância de entrada do amplificador do exercício 1? Este é um valor bom ou ruim? Por quê?
3. Qual é o ganho do circuito da Figura 30.7 também supondo que R1 = 10 kΩ e R2 = 1 MΩ?
4. Qual é a impedância de entrada do amplificador do exercício 3? Este é um valor bom ou ruim? Por quê?
5. Desenhe um multivibrador astável com o circuito integrado 555 com frequência de 10 kHz e ciclo de carga de 85%, onde já definimos que o capacitor C será de 2,2 nF. Apresente os valores comerciais mais próximos dos resistores calculados.
6. Desenhe um multivibrador monoestável com o circuito integrado 555 onde o pulso de saída terá duração de 15 μs e onde já definimos que o valor do resistor será de 1 kΩ.

Parte 6
Circuitos Clássicos

Neste parte apresentamos alguns circuitos básicos que você precisa conhecer e que não havíamos apresentado anteriormente, como fontes de alimentação, multiplicadores de tensão, filtros ativos e geradores de formas de onda.

Capítulo 31
Fontes de Alimentação

Introdução

Fontes de alimentação são circuitos que pegam a tensão alternada da rede elétrica e a converte para o padrão de tensão requerido pelo aparelho a ser alimentado. Na maioria das vezes isso significa pegar 127 V ou 220 V alternados e converter para uma tensão contínua de valor mais baixo (ex.: 12 V contínuos). Todo mundo que curte eletrônica montará, pelo menos uma vez na vida, uma fonte de alimentação. É claro que em alguns casos é necessário montar fontes elevadoras de tensão, porém neste capítulo estaremos abordando apenas as fontes abaixadoras de tensão.

Há duas técnicas básicas de se construir uma fonte de alimentação: linear ou com chaveamento em alta frequência, também conhecida como fonte chaveada, SMPS (Switching Mode Power Supply) ou conversor DC-DC.

Fontes lineares são simples de serem construídas e usam poucos componentes, e é este o tipo de fonte que você possivelmente montará. No entanto, seus componentes são fisicamente grandes, o que faz este tipo de fonte ser fisicamente grande e pesada. Outro problema é que esse tipo de fonte normalmente possui baixa eficiência.

A eficiência de uma fonte, representada pela letra grega Eta minúscula (η), é a relação entre a potência que é consumida pelo circuito que está conectado à fonte (P_o) e a potência que a fonte está consumindo da rede elétrica (P_i). A eficiência de uma fonte ideal é 1 ou 100%, indicando que a potência sendo consumida da rede elétrica e a potência sendo consumida pelo circuito que está conectado à fonte é a mesma, isto é, a fonte de alimentação não con-

some nada para seu próprio funcionamento. Só que, na prática, isso nunca acontece, pois a fonte consome parte da potência sendo puxada da rede elétrica para seu próprio funcionamento. Esse problema é maior em fontes lineares.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \tag{31.1}$$

Para entender esse problema, imagine que você tenha uma fonte de +12 V e a converte para +5 V simplesmente adicionando um circuito integrado regulador de tensão (ex.: 7805). Essa conversão é feita transformando-se a diferença entre as duas tensões em calor. Essa potência dissipada em forma de calor é completamente perdida (não está gerando trabalho), diminuindo drasticamente a eficiência da fonte.

Ou seja, comparada a uma fonte de alimentação com menor eficiência, uma fonte de alimentação com alta eficiência consumirá menos da rede elétrica para seu próprio consumo, significando uma menor conta de eletricidade.

Na Tabela 31.1 resumimos as principais diferenças entre fontes lineares e fontes chaveadas.

Tabela 31.1: Principais diferenças entre fontes lineares e fontes chaveadas.

Característica	Fonte Linear	Fonte Chaveada
Tamanho	Grande	Pequena
Peso	Pesada	Leve
Número de Componentes	Baixo	Alto
Complexidade	Baixa	Alta
Eficiência	Baixa	Alta
Interferência Eletromagnética	Baixa	Alta
Custo Para o Hobista	Baixo	Alto

Atualmente não há praticamente nenhum equipamento eletrônico novo que use fontes lineares, especialmente por conta da eficiência. O custo de fabricação em larga escala deste tipo de fonte, por conta do volume, caiu o suficiente para que isso se tornasse possível. Entretanto, por causa da complexidade de seu projeto e número elevado de componentes, a construção de fontes chaveadas por hobistas é normalmente de custo proibitivo.

Fontes de Alimentação Lineares

Na Figura 31.1 vemos o diagrama de blocos de uma fonte de alimentação linear típica. Ela funciona pegando a tensão alternada da rede elétrica (127 V ou 220 V, ponto “1” do diagrama)

e a reduzindo para um valor próximo ao que desejamos obter em sua saída (por exemplo, 12 V, ponto "2" do diagrama). Em seguida, esta tensão, que ainda é alternada, é retificada e transformada em pulsante, através de diodos (ponto "3" do diagrama). Após esta transformação, a tensão pulsante é transformada em contínua através de um estágio de filtragem, que é formado por um capacitor eletrolítico (ponto "4" do diagrama). Na saída do capacitor eletrolítico a tensão terá uma oscilação, que é removida no estágio de regulação de tensão (ponto "5" do diagrama). Na saída deste estágio a tensão será, finalmente, contínua.

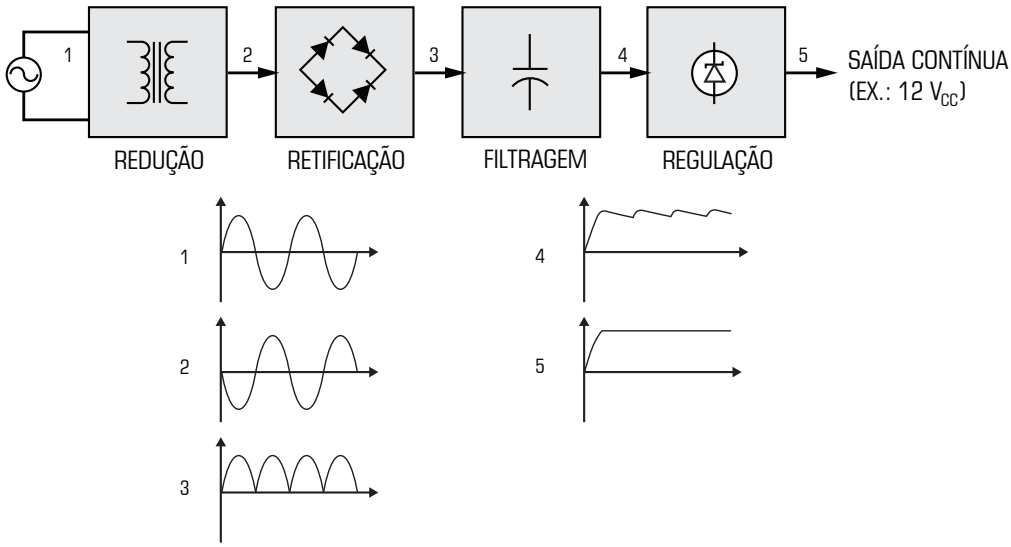


Figura 31.1: Funcionamento simplificado de uma fonte de alimentação linear.

Já na Figura 31.2, vemos o esquema de uma fonte de alimentação de 12 V · 1 A, no qual basearemos nossas explicações.

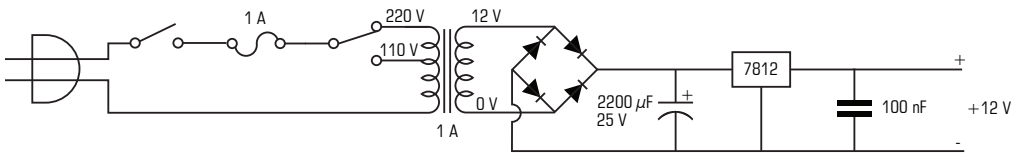


Figura 31.2: Exemplo de uma fonte de alimentação linear.

Vamos agora estudar cada estágio.

Abaixando a Tensão Alternada

A primeira coisa que é feita em uma fonte de alimentação linear é abaixar a tensão alternada da rede elétrica para um valor próximo da tensão que queremos na saída da fonte. Isto é feito através de um transformador abaixador de tensão.

Se usarmos um transformador com entradas para 110 V e 220 V, podemos incluir uma chave de seleção de tensão (chave 110 V/220 V), como fizemos na fonte da Figura 31.2.

É ainda interessante incluir um fusível na entrada da fonte, com corrente de rompimento similar à corrente máxima que queremos que a fonte seja capaz de entregar. Assim, caso a fonte puxe da rede elétrica uma corrente maior do que a do fusível, este fusível rompe-se. Aqui é importante esclarecer que o papel do fusível não é proteger a fonte de alimentação. Caso ele se rompa, isto possivelmente significa que algum componente da fonte queimou-se e entrou em curto. Desta forma, o papel do fusível é remover a fonte da rede elétrica caso algum componente se queime, evitando que, por estar em curto-circuito, a fonte gere um incêndio. Portanto, ao deparar-se com um fusível queimado, é muito provável que a fonte esteja "queimada".

O transformador deverá ser adquirido de acordo com a corrente máxima que a fonte deverá ser capaz de entregar. Em nosso exemplo, como estamos construindo uma fonte de alimentação de 1 A, compraríamos um transformador de 12 V · 1 A.

A saída do transformador ainda é alternada, porém em uma tensão mais baixa (12 V em nosso caso). Lembrando que a tensão rotulada é eficaz (RMS); o valor de pico será maior ($V_p = V_{RMS} \cdot \sqrt{2}$).

É interessante notar que transformadores comerciais possuem enrolamentos em sentidos opostos e, portanto, há uma inversão de fase de 180º em relação à entrada. No caso de fontes de alimentação lineares, essa inversão de fase não afeta em nada o funcionamento do circuito.

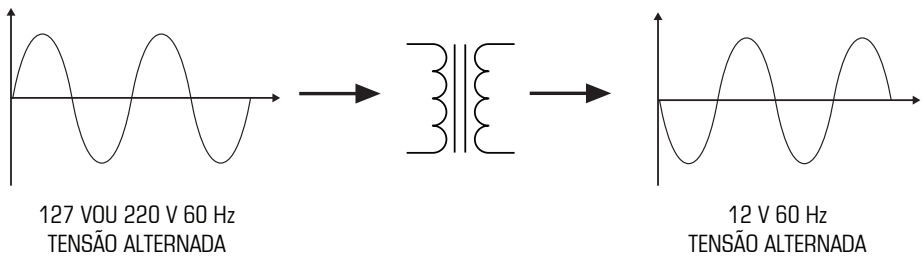


Figura 31.3: Estágio de redução da tensão.

Retificação

O próximo passo é a retificação, processo que consiste em transformar a tensão alternada em uma tensão chamada pulsante. Nesse processo, transformamos os semiciclos negativos da tensão alternada em semiciclos positivos, fazendo com que a forma de onda na saída do retificador seja ainda alternada, porém possuindo somente semiciclos positivos.

Neste estágio devemos montar uma ponte retificadora com quatro diodos, como mostramos em detalhes na Figura 31.4. É possível fazer esta retificação com apenas dois diodos, mas nesse caso precisaremos usar um transformador com "center tape".

Devemos usar diodos com a mesma capacidade de corrente e tensão que a fonte utilizará. Aqui poderíamos usar quatro diodos da série 1N400x, como, por exemplo, o 1N4007.

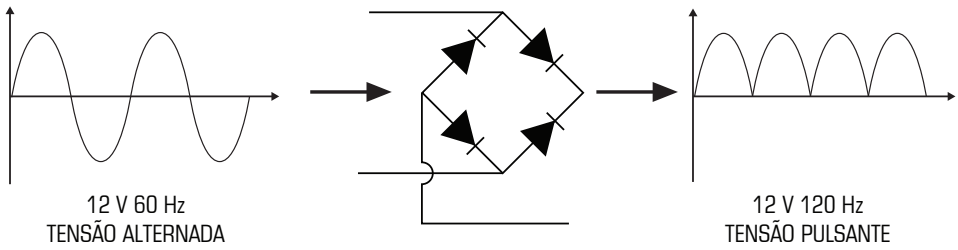


Figura 31.4: Estágio de retificação.

Filtragem

Após a retificação, vem o estágio de filtragem, onde a forma de onda pulsante será transformada em tensão contínua, porém contendo uma pequena oscilação, chamada *ripple*. Tensão contínua contendo esse tipo de oscilação é também chamada de *não regulada*.

Este estágio é formado por um capacitor eletrolítico. Quanto maior o valor desse capacitor, melhor será a filtragem (isto é, menor o *ripple*). Recomendamos que seja usado um capacitor eletrolítico de, no mínimo, 1.000 μF. Em nosso circuito optamos por um capacitor de 2.200 μF.

O ponto mais importante da escolha do capacitor eletrolítico é a sua tensão de alimentação. Repare que em nosso circuito escolhemos um capacitor de 25 V e não de 12 V ou de 16 V. Se colocássemos um capacitor de 12 V ou 16 V nesse circuito, ele literalmente explodiria. A razão é muito simples. Tanto a tensão nominal de um transformador quanto de um capacitor são dadas em valor eficaz (RMS). Assim, o transformador está fornecendo para o circuito 12 V RMS, o que

equivale a 17 V de pico (12 V · $\sqrt{2}$). O capacitor, no entanto, armazena carga no pico da onda. Assim, o capacitor armazenará 17 V. Se usarmos um capacitor de 12 V ou de 16 V, ele estará armazenando mais carga do que é capaz, podendo explodir. Por isso usamos um capacitor de 25 V, que é o valor comercial disponível depois de 16 V. Assim, na hora de definir o capacitor eletrolítico da fonte, você deve multiplicar a tensão de saída do transformador por 1,4 ($\sqrt{2}$) para saber a tensão mínima que o capacitor deverá ter.

Resumimos o que ocorre no estágio de filtragem na Figura 31.5.

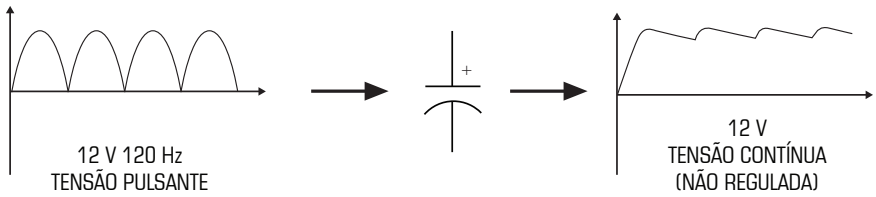


Figura 31.5: Estágio de filtragem.

Regulação de Tensão

Após o capacitor, a tensão obtida já será contínua, porém haverá uma oscilação, chamada *ripple*. Para eliminarmos essa oscilação, basta utilizarmos um circuito regulador de tensão. Em fontes lineares, este circuito poderá ser feito de basicamente três formas:

- Usando um diodo Zener, caso a corrente máxima da fonte seja baixa (ver Capítulo 27 para cálculos).
- Usando um circuito integrado regulador de tensão da série 78xx, caso você esteja construindo uma fonte com corrente máxima de até 1 A.
- Usando um diodo Zener e um transistor de junção bipolar, caso você queira maior capacidade de corrente.

Na Figura 31.6 nós mostramos essas três possibilidades.

Em nosso exemplo (Figura 31.2) optamos por um circuito integrado da série 78xx (um 7812), mas você poderia ter usado um diodo Zener em conjunto com um transistor bipolar. Apenas julgamos o uso de um circuito integrado regulador de tensão muito mais simples, mais rápido e mais barato para a fonte que estamos construindo. O último capacitor é opcional porém recomendado, fazendo uma pequena filtragem na saída do regulador de tensão.

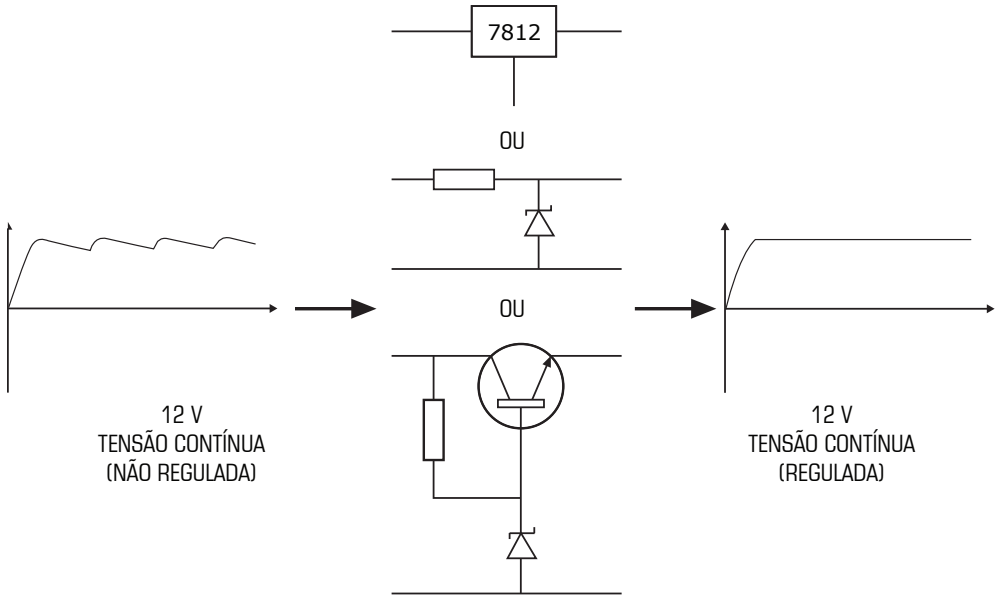


Figura 31.6: Estágio de regulação de tensão.

Fontes de Alimentação Chaveadas

As fontes de alimentação chaveadas, também chamadas conversores DC-DC, funcionam de uma maneira completamente diferente das fontes lineares. Em vez de baixarem a tensão alternada primeiro, a tensão alternada da rede é aumentada e transformada em contínua. Essa alta tensão contínua é então transformada em uma forma de onda retangular de alta frequência usando transistores (chamados transistores chaveadores), e aplicada sobre um transformador para ser reduzida. Na saída do transformador temos um estágio de retificação (feito por diodos e uma bobina), onde a forma de onda retangular é transformada em contínua e, em seguida, um estágio de filtragem, onde ruídos e oscilações (*ripple*) são removidos, que é feito através de bobinas e capacitores.

Como você está vendo, o nome "chaveada" vem do fato de a fonte de alimentação fazer um chaveamento em alta frequência, não tendo nada a ver se a fonte tem uma chave liga/desliga.

A bobina usada do secundário é a "marca registrada" das fontes chaveadas, e seu funcionamento é geralmente mal entendido por técnicos e hobistas, e explicaremos seu papel no tópico *Retificação* (*Secundário*). Existem três maneiras básicas de se posicionar essa bobina, gerando os três tipos básicos de fontes chaveadas, chamadas topologias:

- **Buck-Boost (Flyback):** Nessa configuração a bobina é instalada em paralelo à saída da fonte e é usada quando queremos montar uma fonte de alimentação elevadora de tensão. Essa bobina pode eventualmente ser feita usando uma derivação do transformador principal da fonte. Quando isso é feito, o transformador recebe o nome de *flyback*.
- **Boost:** Nessa configuração a bobina é instalada em série à saída da fonte, antes do diodo retificador. Essa configuração é usada quando queremos montar uma fonte de alimentação elevadora de tensão.
- **Buck:** Nessa configuração a bobina é instalada em série à saída da fonte, após o diodo retificador. Essa configuração é usada quando queremos montar uma fonte de alimentação abaixadora de tensão.

Neste capítulo estaremos abordando somente o último tipo, que é o mais comum. Os outros dois tipos são usados em televisões e monitores de vídeo. Por exemplo, televisões e monitores de vídeo usando tubo de raios catódicos (tubo de imagens) utilizam uma fonte *buck-boost* para alimentar o tubo de imagens (usando um transformador do tipo *flyback*, cujo nome oficial é transformador de saída horizontal), enquanto que modelos usando tela de cristal líquido utilizam uma fonte *boost* (chamada inversor) para alimentar a lâmpada existente atrás do painel de cristal líquido.

É justamente por causa dessa bobina e do transformador que a construção de fontes chaveadas por hobistas é complicada, pois esses componentes precisam ser calculados e fabricados de acordo com as especificações pretendidas, não sendo componentes comerciais.

Outro aspecto que torna fontes de alimentação chaveadas bastante diferentes das fontes lineares é a maneira com que a regulação de tensão é feita. Em fontes lineares temos um circuito fixo na saída da fonte responsável pela regulação. Nas fontes chaveadas a regulação de tensão é feita através de uma realimentação. O circuito de controle dos transistores chaveadores monitora constantemente a saída da fonte. Caso o valor da tensão na saída não esteja correto (isto é, esteja um pouco abaixo ou um pouco acima do valor pretendido), ele ajusta o ciclo de carga da forma de onda que é aplicada no transformador, o que faz com que a tensão na saída do estágio de retificação do secundário aumente ou diminua, de acordo com o comportamento pretendido para corrigir o problema. O uso deste esquema engenhoso de regulação de tensão é o principal motivo pelo qual fontes chaveadas são mais eficientes, já que não há um componente na saída da fonte desperdiçando potência em forma de calor.

Na Figura 31.7 vemos o diagrama de blocos de uma fonte de alimentação chaveada abaixadora de tensão (*buck*) baseada em uma configuração chamada meia-ponte. Há várias configurações que podem ser usadas, e cada uma deles faz com que o funcionamento e os blocos existentes variem um pouco (explicaremos as principais diferenças no decorrer do capítulo).

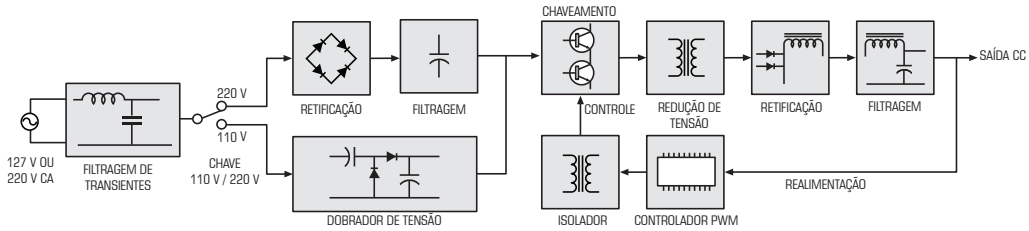


Figura 31.7: Funcionamento simplificado de uma fonte de alimentação chaveada (configuração meia-ponte).

Como fontes chaveadas transformam a tensão da rede elétrica em contínua antes de aplicá-la sobre o transformador, este tipo de fonte é também conhecido como conversor CC-CC, pois transforma uma tensão contínua de um determinado valor em uma tensão contínua de outro valor.

Para nos aprofundarmos um pouco mais no estudo do tema, vamos abordar o funcionamento de uma fonte de alimentação chaveada abaixadora de tensão (*buck*) típica usada para alimentar equipamentos eletrônicos, tais como computadores, tocadores de DVD, consoles de videogame modernos etc.

Filtragem de Transientes

Um problema derivado do chaveamento em alta frequência é a geração de interferência eletromagnética (também conhecida como EMI, ElectroMagnetic Interference). Com isso, toda a fonte chaveada deve ter, logo em sua entrada, uma série de capacitores e bobinas para filtrarem não só a tensão que entra na fonte, mas para evitar que a interferência gerada pela fonte entre de volta na rede elétrica, evitando interferência em outros equipamentos eletrônicos. Na Figura 31.8 mostramos o diagrama de um filtro típico. Neste estágio os capacitores colocados em paralelo à rede elétrica são chamados "X", e os capacitores colocados entre cada fio da rede elétrica e o aterramento da rede elétrica são chamados "Y". O termistor é usado para limitar a corrente quando a fonte de alimentação está fria e os capacitores eletrolíticos do primário estão "vazios" (este componente é normalmente colocado após o circuito de PFC ativo, em fontes que têm este tipo de circuito). Esta etapa é um filtro passa-baixa sintonizado em 50 - 60 Hz.

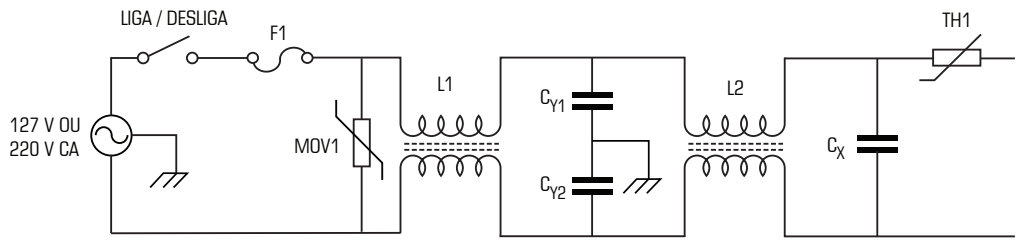


Figura 31.8: Estágio de filtragem de transientes.

PFC Passivo

Se a fonte de alimentação tiver um circuito de correção do fator de potência (PFC) do tipo passivo, este será colocado em série entre o estágio de filtragem de transientes e a ponte retificadora. Este tipo de circuito é formado por uma enorme bobina (que fisicamente se assemelha a um transformador) e um capacitor colocados em paralelo. Este tipo de circuito serve para reduzir a quantidade de energia reativa que é consumida pelo circuito (para uma explicação mais detalhada sobre este assunto, veja https://www.clubedohardware.com.br/artigos/energia/tudo-o-que-voc%C3%AA-precisa-saber-sobre-fontes-de-alimenta%C3%A7%C3%A3o-r34441).

Retificação, Dobrador de Tensão e Filtragem

Após o estágio de filtragem de transientes, temos o estágio de retificação, que é composto por uma ponte retificadora. Logo após este estágio, temos um circuito de filtragem, formado por dois capacitores eletrolíticos, fazendo com que a tensão seja transformada em contínua (não regulada). Esses capacitores são os maiores capacitores encontrados em uma fonte chaveada.

Se a fonte tiver uma chave para seleção manual da tensão de entrada (chave 110 V / 220 V), esta chave transformará a ponte retificadora em um circuito dobrador de tensão (usando os capacitores de filtragem), de forma que na saída do circuito tenhamos sempre 220 V, independentemente da tensão de entrada ser 127 V ou 220 V. No próximo capítulo explicaremos melhor como o circuito dobrador de tensão funciona.

Em fontes de alimentação com configuração meia-ponte, os varistores, quando existentes, estão normalmente instalados em paralelo aos capacitores eletrolíticos desse estágio.

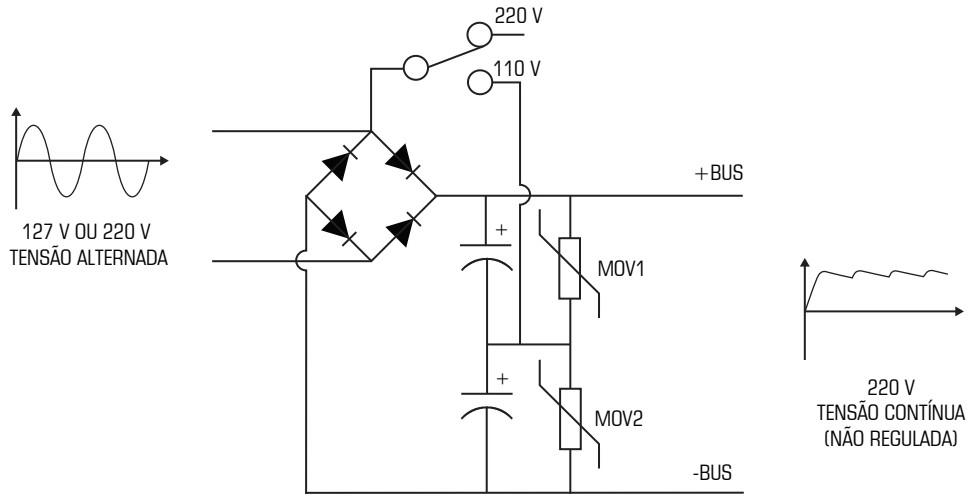


Figura 31.9: Retificação, dobrador de tensão e filtragem.

PFC Ativo

Se a fonte de alimentação contemplar um circuito ativo de correção do fator de potência (PFC, Power Factor Correction), este estará logo após a ponte retificadora.

Este circuito é formado por uma grande bobina (a maior do primário da fonte), um diodo e um ou mais transistores (normalmente do tipo MOSFET), além de um circuito de controle próprio (normalmente um circuito integrado). Em fontes que trazem este circuito, ele também eleva a tensão para cerca de 400 V em sua saída independentemente da tensão de entrada, e por isso fontes de alimentação com circuito PFC ativo normalmente não precisam de chave seletora 110V/220V.

Em fontes que utilizam este tipo de circuito, o termistor está normalmente localizado entre o circuito PFC ativo e o capacitor eletrolítico de filtragem, em vez de estar no estágio de filtragem de transientes.

A tensão sobre o resistor R_S é monitorada pelo circuito de controle de modo a saber o consumo da fonte de alimentação.

A saída do circuito PFC ativo é filtrada usando um capacitor eletrolítico, de forma que temos na saída deste estágio uma tensão contínua por volta de 400 V (o valor exato vai depender do projeto da fonte). Esse capacitor é o maior capacitor encontrado em uma fonte chaveada.

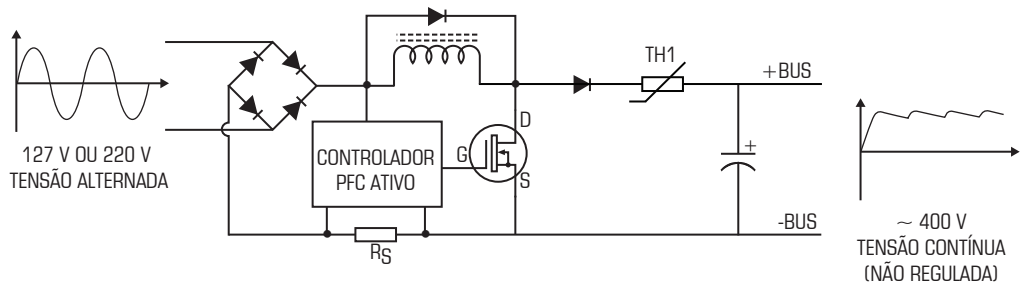


Figura 31.10: Circuito PFC ativo típico.

Chaveamento

Um ou mais transistores chaveiam a alta tensão contínua de forma a gerar uma forma de onda retangular de alta frequência (20 kHz ou mais) e alta tensão na saída desta etapa. Esses transistores podem ser do tipo bipolar (projetos mais antigos, menor eficiência) ou do tipo MOSFET (projetos mais modernos, maior eficiência).

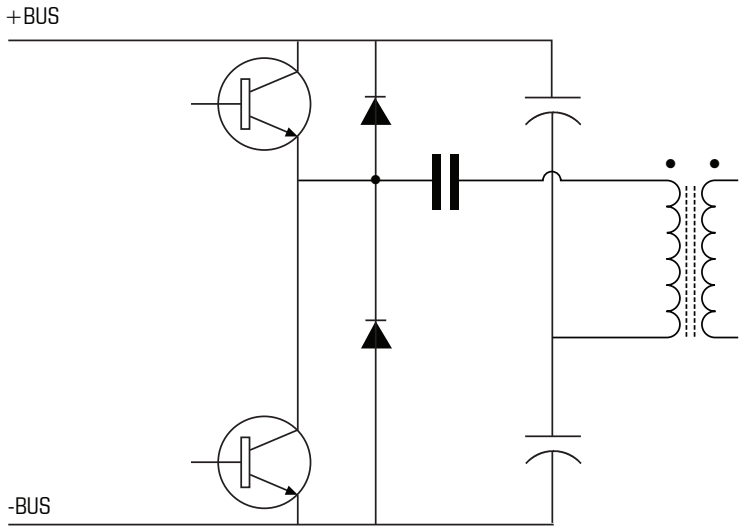


Figura 31.11: Meia-ponte.

Os transistores chaveadores podem ser configurados de diversas formas, e essa configuração diz a configuração da fonte de alimentação. Nas Figuras 31.11 a 31.16 mostramos as configurações mais usuais. Para simplificar as ilustrações, não desenhamos o circuito de controle, que é ligado à base ou ao gate dos transistores. O transformador usado na configuração de chaveamento direto com um transistor tem dois enrolamentos independentes no primário.

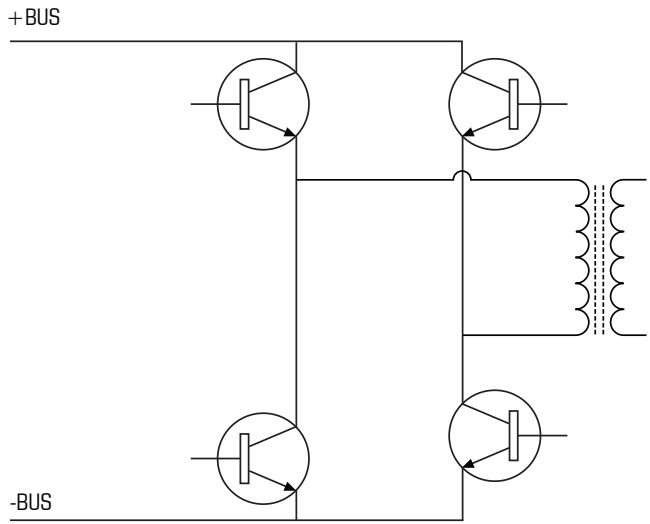


Figura 31.12: Ponte completa.

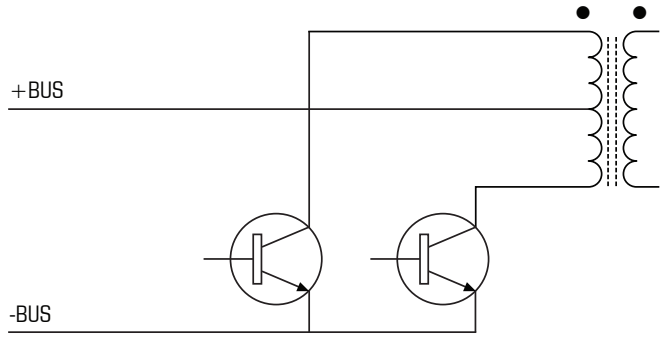


Figura 31.13: Push-pull.

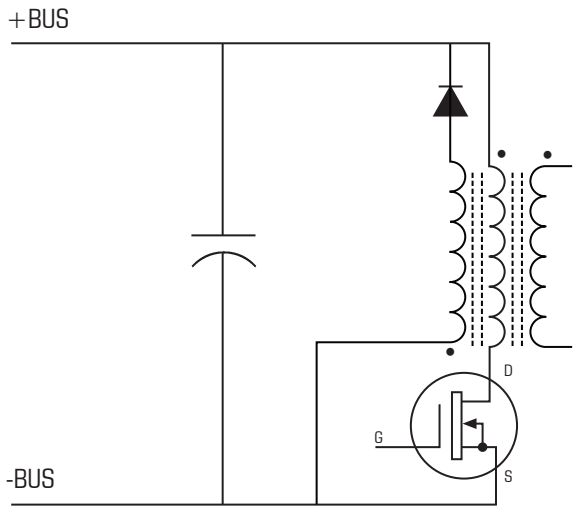


Figura 31.14: Chaveamento direto com um transistor.

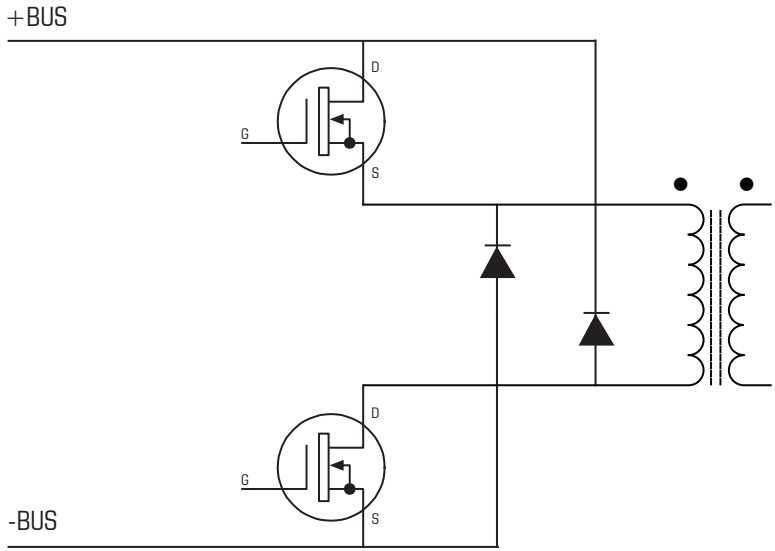


Figura 31.15: Chaveamento direto com dois transistores.

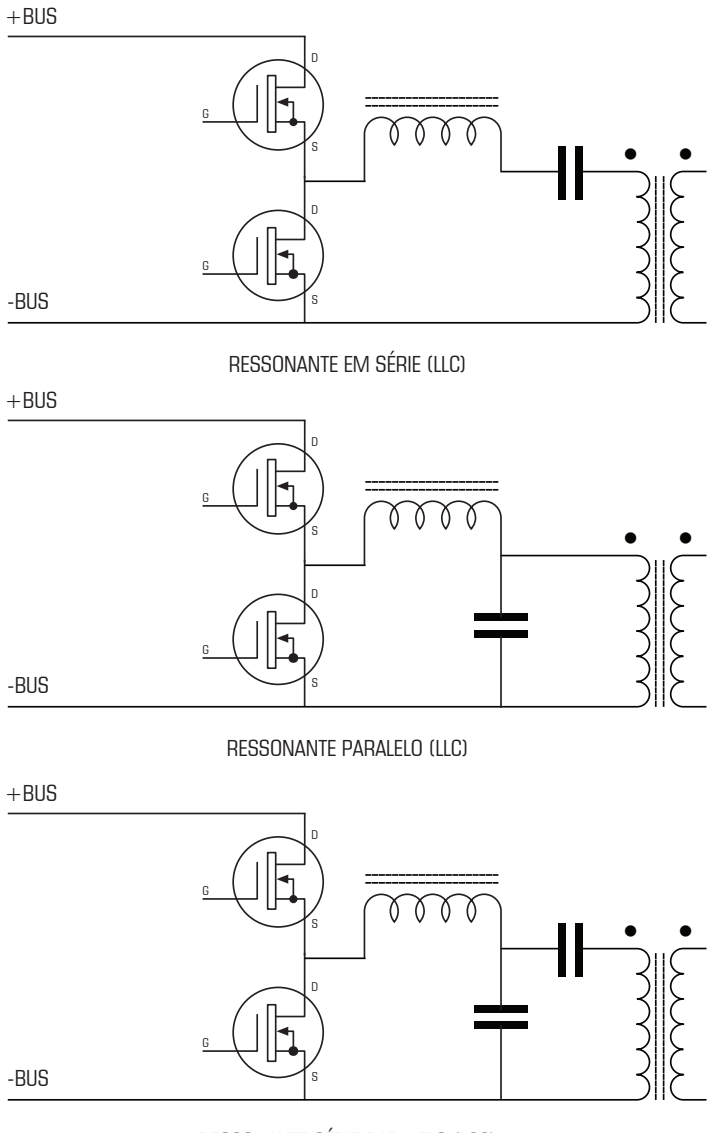


Figura 31.16: Ressonante.

Há três tipos de projeto ressonante possíveis, dependendo de como o capacitor é instalado: em série (também chamado SRC, Series Resonant Converter), em paralelo (também chamado PRC, Parallel Resonant Converter) e em série-paralelo (também chamado SPRC, Series Parallel Resonant Converter). Os dois primeiros também são chamados LLC (por usarem duas bobinas e um capacitor, sendo que a segunda bobina é o primário do transformador) e o terceiro é também chamado LCC (por usar uma bobina e dois capacitores).

Independentemente da configuração usada, os transistores chaveadores são controlados por um circuito chamado PWM (Pulse Width Modulation, modulação por largura de pulso), normalmente usando um circuito integrado para esta função. Esse circuito é realimentado pela saída da fonte, de forma que o ciclo de carga da forma de onda gerada variará de modo a manter a saída da fonte com o valor pretendido, conforme havíamos explicado anteriormente.

O circuito controlador PWM pode estar fisicamente no primário ou no secundário da fonte, dependendo do projeto da mesma. Se ele estiver localizado no secundário, a conexão entre ele e os transistores chaveadores é feita usando-se um pequeno transformador isolador, para que não exista contato físico entre o primário e o secundário. Neste caso, a linha de realimentação (saída da fonte) é ligada diretamente ao circuito de controle. Caso o circuito de controle esteja fisicamente localizado no primário, a linha de realimentação usa um optoisolador, de forma que o secundário e o primário fiquem completamente isolados.

A saída do estágio de chaveamento é aplicada diretamente no transformador principal da fonte de alimentação, como ilustrado.

Retificação (Secundário)

Na saída do transformador da fonte de alimentação temos uma forma de onda retangular. Esta forma de onda precisa ser retificada, de modo a ser transformada em uma tensão contínua. O processo de retificação do secundário de fontes de alimentação chaveadas é normalmente mal entendido.

A retificação é feita por dois diodos (frequentemente do tipo Schottky para aumentar a eficiência da fonte) e uma bobina. Essa bobina é fisicamente grande, sendo a maior bobina presente no secundário da fonte. Eventualmente os diodos podem ser substituídos por transistores MOSFET, de modo a aumentar a eficiência. Quando isso é feito, diz-se que a fonte tem um projeto síncrono.

A maneira como esses componentes são conectados varia de acordo com a forma de onda produzida pelos transistores chaveadores. Existem basicamente duas possibilidades: quando

a configuração usada é de chaveamento direto (tanto usando um quanto usando dois transistores) ou quando a configuração é qualquer uma das outras. Vemos essas duas possibilidades na Figura 31.17.

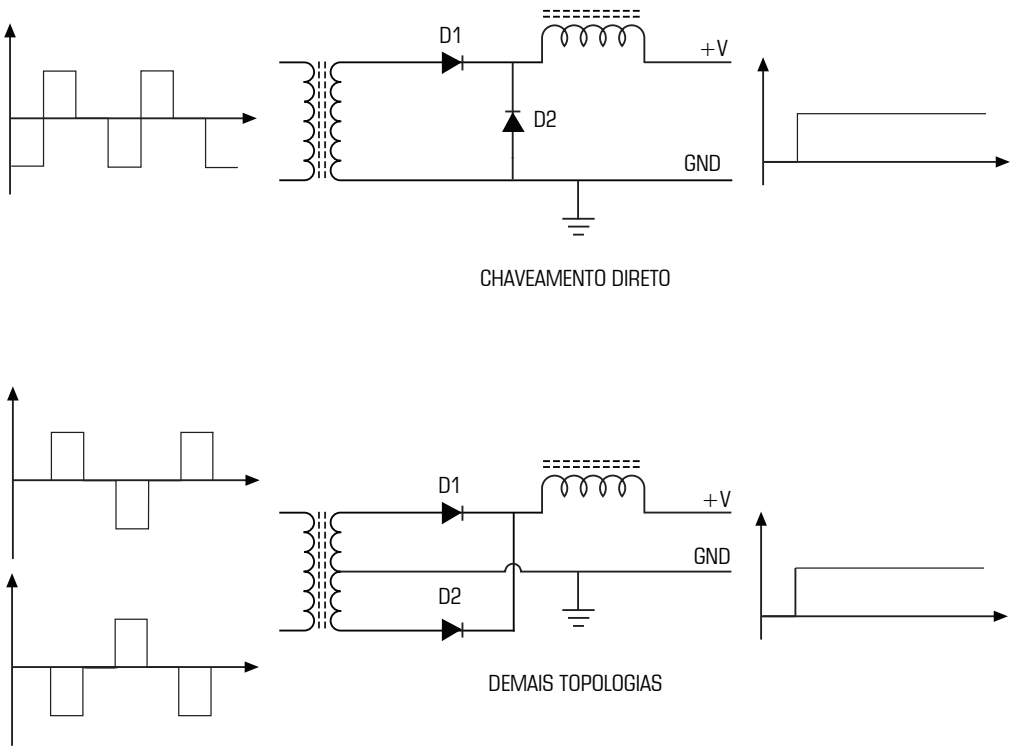


Figura 31.17: Etapa de retificação do secundário.

Nos dois casos, a conversão da forma de onda presente no secundário do transformador em contínua é feita com um auxílio da bobina. No primeiro circuito, quando o diodo D1 está conduzindo, a bobina se carrega e, ao mesmo tempo, tensão é entregue na saída da fonte. Quando D1 não está mais conduzindo, a bobina descarrega-se através de D2, que é também chamado "diodo de giro livre" ("freewheeling"), fazendo com que a tensão na saída da fonte seja constante. Se for usada a forma de onda apresentada, D1 conduzirá 1/3 do tempo, enquanto que D2 conduzirá 2/3 do tempo.

O segundo circuito usa o mesmo princípio, só que, como usamos duas saídas do transformador, temos duas formas de onda simétricas, isto é, espelhadas, sendo aplicadas sobre cada diodo. Quando o diodo D1 está conduzindo, o diodo D2 está bloqueando. Com isso a bobina se carrega e, ao mesmo tempo, tensão é entregue na saída da fonte. Assim a tensão entregue pelo transformador cai a zero, e o diodo D1 para de conduzir. Neste instante a bobina descarrega-se e, ao mesmo tempo, tensão é entregue na saída da fonte. Em seguida, a polaridade da forma de onda é invertida. D2 conduzirá, carregando a bobina e entregando tensão à saída da fonte. Assim que a tensão entregue pelo transformador cair a zero novamente, o diodo D2 para de conduzir e a bobina é descarregada, e tensão é entregue à saída da fonte. E o processo continua. Outra forma de explicar o funcionamento dessa retificação é considerar que na junção de D1 e D2 antes da bobina, a forma de onda será quadrada, e quando esta forma de onda estiver "ativa", a tensão seguirá diretamente para a saída, carregando a bobina, e quando ela estiver em 0 V a bobina se descarregará, alimentando a saída.

Em resumo, parte do tempo a tensão entregue à saída da fonte estará vindo diretamente do transformador, e parte do tempo ela estará vindo da descarga da bobina.

Filtragem (Secundário)

A saída do estágio de retificação do secundário é praticamente contínua, porém o chaveamento que é feito entre a tensão do transformador e a tensão armazenada na bobina pela etapa de retificação do secundário não é perfeita, gerando ruído. Já que a forma de onda vinda do transformador está na ordem de kHz, este ruído também está na casa dos kHz. Precisamos, então, adicionar um filtro do tipo passa-baixa para remover esse ruído de alta frequência.

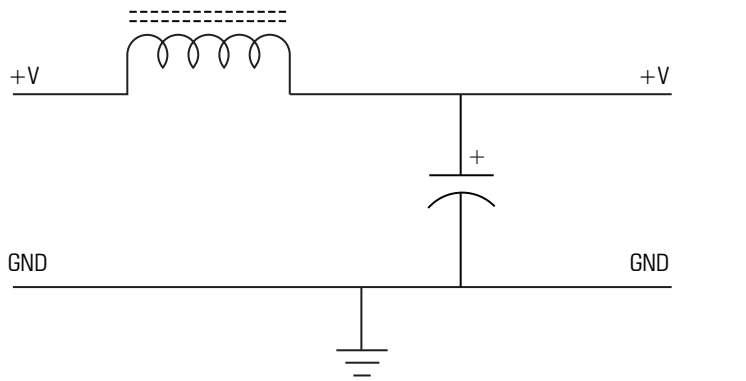


Figura 31.18: Etapa de filtragem do secundário.

Esse filtro é facilmente feito usando-se uma bobina e um capacitor, como mostrado na Figura 31.18. Note que esta bobina não é a mesma da usada na etapa de retificação: enquanto a bobina da etapa de retificação é grande, as bobinas de filtragem são relativamente pequenas.

A saída da etapa de filtragem será perfeitamente contínua e será usada para alimentar o circuito principal que está conectado à fonte de alimentação.

Realimentação

A saída da fonte é ligada ao circuito controlador PWM para que ele efetue a regulação de tensão, conforme já descrito anteriormente.

Proteções

A fonte de alimentação poderá opcionalmente ter circuitos de proteção que desligarão a fonte em caso de comportamento anormal. As proteções mais comuns são as seguintes:

- **Proteção contra curto-circuito (SCP, Short-Circuit Protection):** Desliga a fonte caso qualquer uma de suas saídas entre em curto-circuito.
- **Proteção contra sobretensão (OVP, Over Voltage Protection):** Desliga a fonte caso o valor de sua saída esteja muito acima do especificado. Também pode ser implementado circuito semelhante para desligar a fonte caso a tensão da rede elétrica esteja muito acima do especificado.
- **Proteção contra subtensão (UVP, Under Voltage Protection):** Desliga a fonte caso o valor de sua saída esteja muito abaixo do especificado. Também pode ser implementado circuito semelhante para desligar a fonte caso a tensão da rede elétrica esteja muito abaixo do especificado.
- **Proteção contra sobretemperatura (OTP, Over Temperature Protection):** Desliga a fonte caso a temperatura interna (normalmente monitorada no dissipador de calor dos retificadores do secundário) esteja acima de um determinado valor.
- **Proteção contra sobrecarga de potência (OPP, Over Power Protection, ou OLP, Over Load Protection):** Desliga a fonte caso a mesma esteja puxando uma potência acima do especificado.
- **Proteção contra sobrecarga de corrente (OCP, Over Current Protection):** Desliga a fonte caso uma das saídas esteja puxando mais corrente do que o especificado.

Em https://www.clubedohardware.com.br/artigos/energia/tudo-o-que-voc%C3%AA-precisa-saber-sobre-as-prote%C3%A7%C3%B5es-da-fonte-de-alimenta%C3%A7%C3%A3o-r35264 você encontrará mais detalhes de como essas proteções são implementadas na prática.

◆◆◆

Exercícios

1. Em uma fonte de alimentação linear de 25 V, qual é a tensão mínima nominal do capacitor eletrolítico que deverá ser usado?
2. Se um aparelho está consumindo 150 W de uma fonte com 75% de eficiência, qual é a potência que a fonte está consumindo da rede elétrica? Quantos watts estão sendo desperdiçados?
3. O que é uma fonte de alimentação síncrona?
4. Todos os itens abaixo ajudam a aumentar a eficiência de fontes de alimentação chaveadas, exceto:
   a. Uso de diodos Schottky
   b. Uso de transistores MOSFET
   c. Uso de capacitores sólidos na etapa de filtragem do secundário
   d. Uso de transformador com menor área em sua curva de histerese
   e. Uso de bobina do secundário com menor área em sua curva de histerese
5. Os nomes abaixo são configurações possíveis de fontes de alimentação chaveadas, exceto:
   a. Push-pull
   b. Chaveamento direto
   c. Meia-onda
   d. Onda completa
   e. Inversora de fase
6. Fontes de alimentação chaveadas abaixadoras de tensão são baseadas em uma topologia chamada _____.
7. Fontes de alimentação chaveadas elevadoras de tensão podem ser baseadas em duas topologias: _____ ou _____.
8. Analise o circuito da Figura 31.19 e responda:
   a. Esta fonte tem circuito PFC?
   b. Qual é a configuração usada na etapa de chaveamento?
   c. Que tipo de componente está fazendo o isolamento da linha de realimentação?
   d. O controlador PWM está localizado no primário ou no secundário da fonte?

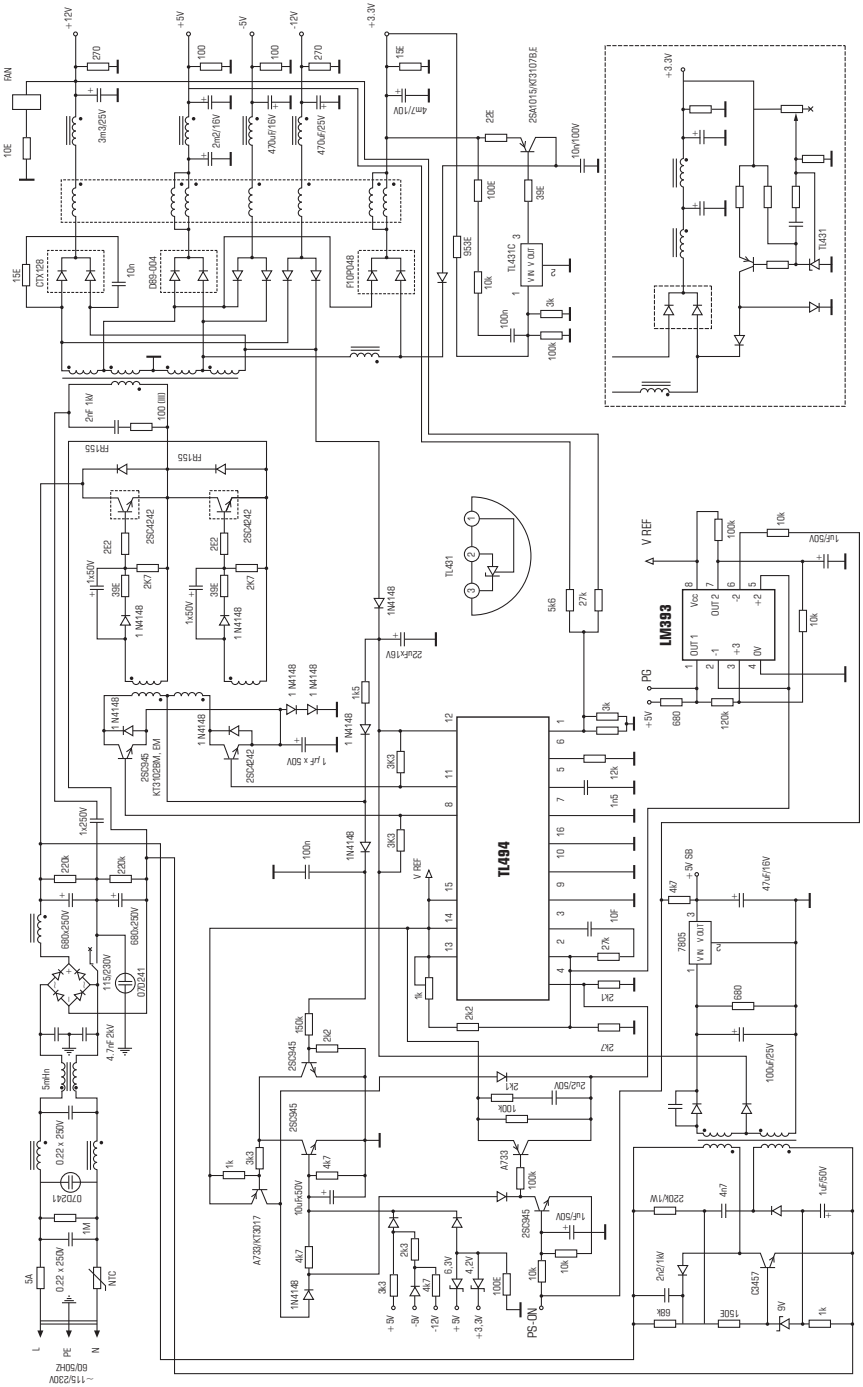


Figura 31.19: Fonte de alimentação a ser analisada

Capítulo 32
Multiplicadores de Tensão

Introdução

Estudamos no Capítulo 26 que os transformadores podem ser usados para aumentar uma tensão alternada. Os transformadores, no entanto, são componentes grandes e pesados. Uma técnica muito interessante para aumentarmos uma determinada tensão alternada é através do uso de um circuito multiplicador de tensão, que, além de elevar tensões alternadas, apresenta a tensão retificada e filtrada em sua saída (a saída desse tipo de circuito é uma tensão contínua não regulada, isto é, com oscilação). No capítulo passado vimos que fontes chaveadas podem usar circuitos deste tipo.

Os circuitos multiplicadores de tensão são classificados de acordo com quantas vezes eles aumentam a tensão original. Assim, um circuito dobrador de tensão duplica a tensão aplicada, um circuito triplicador de tensão triplica a tensão aplicada, e assim sucessivamente.

Esses circuitos são formados por diodos e capacitores eletrolíticos

Dobrador de Tensão de Meia-Onda

O circuito dobrador de tensão de meia-onda (também chamado dobrador de tensão de Greinacher, de Cockcroft-Walton ou de Villard, embora esta última denominação esteja errada), mostrado na Figura 32.1, funciona da seguinte forma. No primeiro semiciclo positivo, o diodo D1 conduz e o capacitor C2 carrega-se com o valor de pico da entrada. Neste primeiro semiciclo, te-

remos na saída o valor da tensão da entrada. No primeiro semiciclo negativo o diodo D2 conduz, carregando o capacitor C1 com o valor de pico da entrada. O capacitor C2 mantém na saída o valor armazenado anteriormente, isto é, valor de pico da entrada. No próximo semiciclo positivo, o diodo D1 conduzirá, fazendo com que tenhamos na saída a tensão da entrada mais o valor armazenado em C2, ou seja, teremos o dobro da tensão de pico na saída. C2 se carregará com este valor. A partir desse momento, teremos duas vezes o valor de pico na saída do circuito.

Na Figura 32.1 você observa com detalhes a forma de onda na entrada e na saída do circuito. Repare que na saída não só teremos o dobro da tensão da entrada, mas a tensão será contínua (não regulada – haverá oscilação na saída).

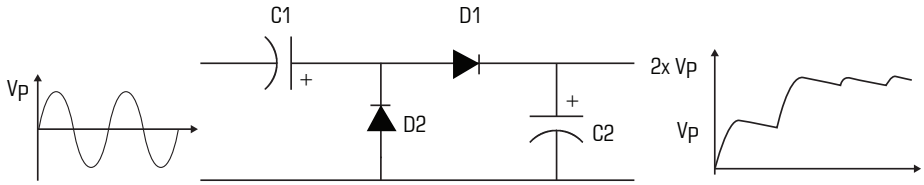


Figura 32.1: Circuito dobrador de tensão de meia-onda.

O capacitor C1 deverá ter uma tensão nominal de pelo menos o valor de pico da tensão de entrada, enquanto que o capacitor C2 deverá ter uma tensão nominal de pelo menos o dobro do valor de pico da tensão de entrada. Se a tensão de entrada for dada em valor eficaz (RMS), multiplique-o por 1,4 ($\sqrt{2}$) para saber o valor de pico equivalente. É importante lembrar que é sempre bom deixar uma margem de segurança na hora de escolher as tensões nominais dos capacitores.

Da mesma forma, o diodo D1 deverá ter uma tensão nominal de pelo menos o valor da tensão de entrada, enquanto que o diodo D2 deverá ter uma tensão nominal de pelo menos o dobro da tensão de entrada.

Um pequeno detalhe que poderá fazer diferença é que na realidade a tensão obtida na saída será o dobro da tensão de pico menos a queda de tensão sobre os diodos, ou seja, menos 1,4 V (0,7 V por diodo), aproximadamente.

Dobrador de Tensão de Onda Completa

Já o dobrador de onda completa, também conhecido como dobrador de Delon, pode ser feito com dois ou quatro diodos.

O circuito com dois diodos é mostrado na Figura 32.2. Este circuito funciona da seguinte forma. Durante o semiciclo positivo, o diodo D1 conduz e o capacitor C1 é carregado com o valor de pico da tensão de entrada. Durante o semiciclo negativo, o diodo D2 conduz e o capacitor C2 é carregado com o valor de pico da tensão de entrada. A partir daí, como esses capacitores estão conectados em paralelo à saída do circuito, teremos como tensão resultante a soma do valor carregado nos dois capacitores, isto é, o dobro da tensão de pico da entrada.

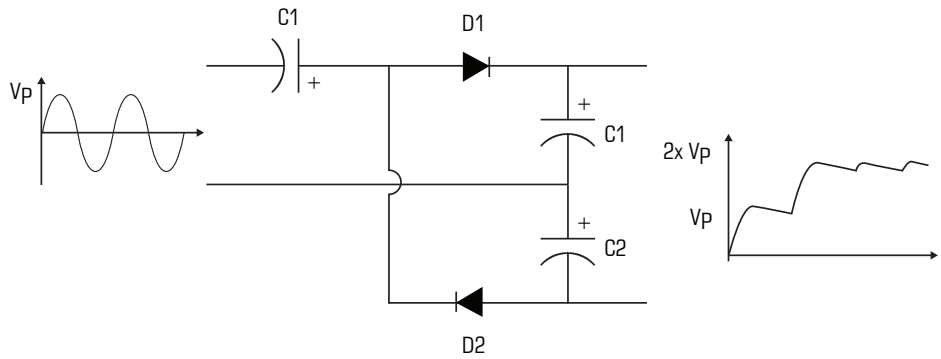


Figura 32.2: Circuito dobrador de tensão de onda completa com dois diodos.

Já o circuito com quatro diodos é mostrado na Figura 32.3 e funciona de maneira análoga. Sua principal vantagem é poder, através da colocação de uma chave 110 V/220 V, fazer com que o circuito opere como um retificador convencional (quando essa chave é posicionada em "220 V", removendo a ligação entre os dois capacitores e a ponte retificadora) ou como um dobrador de tensão (quando essa chave é posicionada em "110 V", fazendo a ligação entre os dois capacitores e a ponte retificadora), fazendo com que haja sempre por volta de 220 V na saída do circuito. Este circuito é amplamente usado por fontes de alimentação chaveadas (ver capítulo passado).

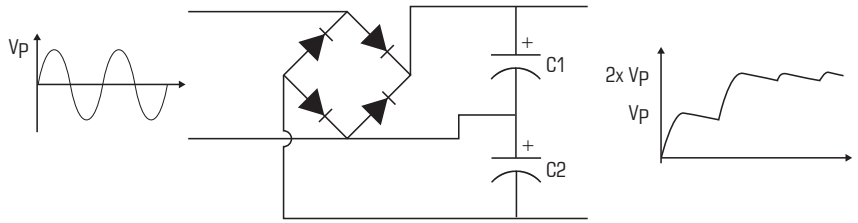


Figura 32.3: Circuito dobrador de tensão de onda completa com quatro diodos.

Repare que nos dois circuitos não só teremos o dobro da tensão da entrada, mas a tensão será contínua (não regulada – haverá oscilação na saída).

A vantagem do circuito dobrador de tensão de onda completa sobre o dobrador de meia-onda é que no modelo onda completa os capacitores precisam ter uma tensão rotulada de pelo menos o valor de pico da tensão de entrada, enquanto que no modelo meia-onda o segundo capacitor precisa ter uma tensão rotulada de pelo menos o dobro do valor de pico da tensão da entrada. Já a vantagem do dobrador de tensão de meia-onda é que ele pode ser facilmente expandido para gerar triplicadores e quadruplicadores de tensão. É importante lembrar que é sempre bom deixar uma margem de segurança na hora de escolher as tensões nominais dos capacitores.

Lembrando sempre que você deverá efetuar todos os cálculos usando valores de pico e, se a tensão de entrada for dada em valor eficaz (RMS), multiplique-o por 1,4 ($\sqrt{2}$) para saber o valor de pico equivalente.

Um pequeno detalhe que poderá fazer diferença é que na realidade a tensão obtida na saída será o dobro da tensão de pico menos a queda de tensão sobre os diodos, ou seja, menos 1,4 V (0,7 V por diodo), aproximadamente.

Triplicador de Tensão, Quadruplicador de Tensão e Outros

Há algumas maneiras de se fazer um circuito que multiplica a tensão de entrada mais do que duas vezes. A maneira mais simples é encarar o dobrador de tensão de meia-onda como um "módulo" para a construção de circuitos capazes de multiplicar a tensão alternada de entrada pelo número que quisermos. Este esquema é também chamado cascateamento de Greinacher ou cascateamento de Cockcroft-Walton (algumas bibliografias chamam esse esquema de cascateamento de Villard, mas esta denominação está errada). A cada módulo adicionado, multiplicamos a tensão de entrada duas vezes mais.

Na Figura 32.4 mostramos esse esquema de cascateamento. O diagrama é basicamente o mesmo da Figura 31.1, porém desenhado com outra orientação para facilitar. A cada estágio adicionado, multiplicamos a tensão de entrada por dois. O diagrama mostra um multiplicador de tensão com dois estágios, onde podemos multiplicar a tensão de entrada em até quatro vezes. Note como continuamos tendo saídas para 2x a tensão de entrada e 3x a tensão de entrada. Assim, se colocarmos um número Z de estágios, podemos multiplicar a tensão de entrada por até $2 \cdot Z$. A saída será feita com um fio no ponto de multiplicação pretendido (2x, 3x, 4x etc.) e o outro fio no ponto marcado como terra.

Se você quiser usar um multiplicador ímpar (por exemplo, um triplicador ou quintuplicador de tensão), então poderá remover o capacitor e o diodo mais à direita do circuito.

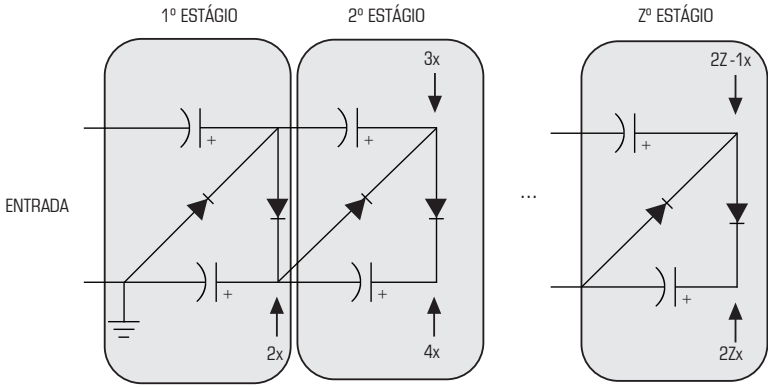


Figura 32.4: Multiplicador de tensão de múltiplos estágios.

Interessante notar que os capacitores dos estágios adicionais serão todos carregados com o dobro da tensão de pico da entrada e, com isso, precisam ter uma tensão rotulada de pelo menos o dobro da tensão de pico da entrada. Se a tensão de entrada for dada em valor eficaz (RMS), multiplique-o por 1,4 ($\sqrt{2}$) para saber o valor de pico equivalente. O valor dos diodos deverá ser também compatível com o dobro da tensão de pico da entrada. É importante lembrar que é sempre bom deixar uma margem de segurança na hora de escolher as tensões nominais dos capacitores.

Não se esqueça que devemos deduzir as quedas de tensão dos diodos para o valor exato a ser obtido na saída. Por exemplo, em um circuito quadruplicador de tensão haverá quatro diodos e com isso a tensão na saída será quatro vezes a tensão na entrada menos 2,8 V (0,7 V · 4).

◆◆◆

Exercícios

1. Em um circuito triplicador de tensão conectado a uma rede elétrica de 127 V, quais deverão ser os valores nominais mínimos dos capacitores e dos diodos?
2. Quantos capacitores e diodos precisaremos para montar um circuito que multiplique uma tensão alternada por oito?
3. Supondo que no circuito do exercício 2 a tensão de entrada seja de 12 V de pico, qual é a tensão que teremos na saída?

Capítulo 33
Filtros

Introdução

Nos Capítulos 24 e 25 estudamos que capacitores e indutores podem ser usados como filtros. Filtros utilizando componentes sem alimentação elétrica são chamados *filtros passivos*. Por exemplo, filtros existentes em caixas de som são filtros passivos, já que não usam nenhuma fonte de alimentação externa para efetuarem a sua filtragem. Filtros passivos são construídos basicamente a partir de bobinas e capacitores.

É possível construirmos *filtros ativos*, isto é, filtros usando componentes eletrônicos com alimentação elétrica. Este tipo de circuito possui maior precisão, maior facilidade de cálculo e maior facilidade de reconfiguração. O tipo de circuito que mais se presta a esse propósito é o amplificador operacional, componente que estudamos no Capítulo 30.

Tipos

Filtros podem ser classificados basicamente em quatro tipos:

- **Passa-alta:** Deixa passar frequências superiores a uma frequência predeterminada, bloqueando frequências inferiores a esta.
- **Passa-baixa:** Deixa passar frequências inferiores a uma frequência predeterminada, bloqueando frequências acima desta.
- **Passa-faixa:** Deixa passar frequências dentro de uma faixa predeterminada, bloqueando frequências que não estejam nesta faixa.

◆ **Rejeita-faixa:** Deixa passar todas as frequências menos uma determinada frequência preestabelecida.

Na Figura 33.1 representamos graficamente o funcionamento desses quatro tipos de filtros.

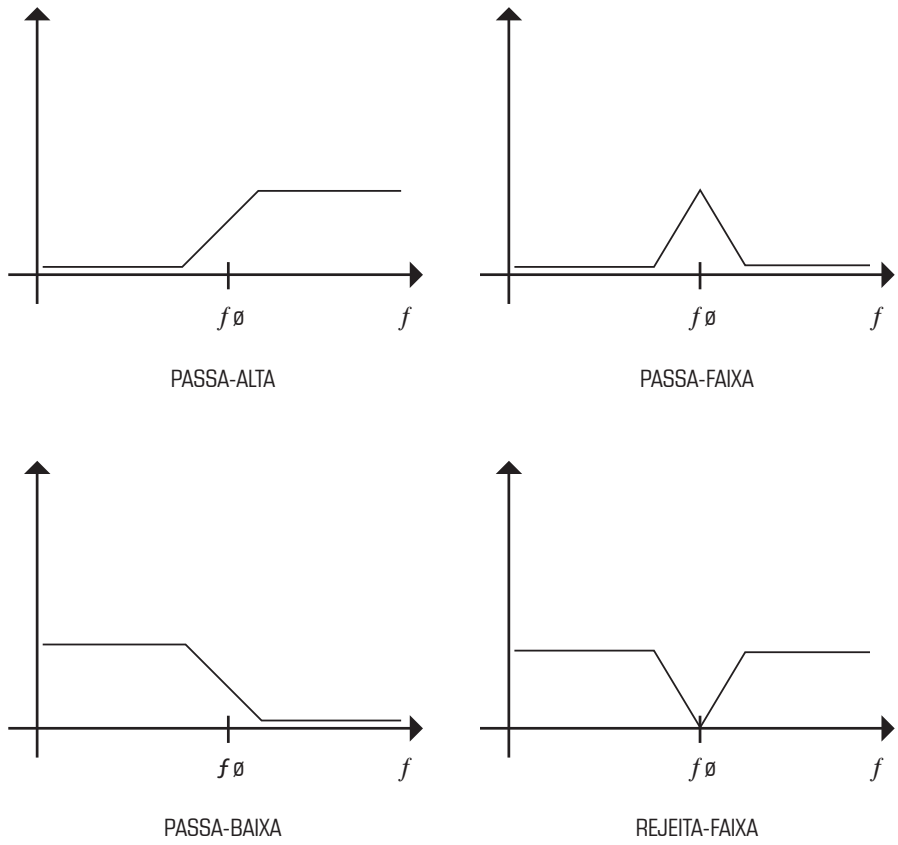


Figura 33.1: Filtros.

Filtros Passa-Alta

Como já explicado, os filtros passa-alta bloqueiam frequências abaixo de uma determinada frequência (frequência de corte, representada como f nos cálculos a seguir), deixando passar

Transaction: HP17915499929393 e-mail: leticiamarchitotal@gmail.com CPF

frequências acima desta. Um exemplo de uso deste tipo de filtro é em conjunto com um tweeter em caixas de som. Como o tweeter reproduz somente sons agudos (altas frequências), um filtro passa-alta cortará sons graves (baixas frequências), aumentando a eficiência do amplificador, melhorando a fidelidade do som e até mesmo evitando a queima do alto-falante.

Filtros Passa-Alta Passivos

Filtros passa-alta passivos podem ser construídos de diversas formas, as mais comuns sendo mostradas na Figura 33.2. Como você pode ver, neste tipo de filtro, capacitores, caso existentes, são instalados em série à saída e bobinas, caso existentes, são instaladas em paralelo à saída. A posição dos capacitores e bobinas é trocada em relação aos filtros passa-baixa passivo, como veremos mais tarde.

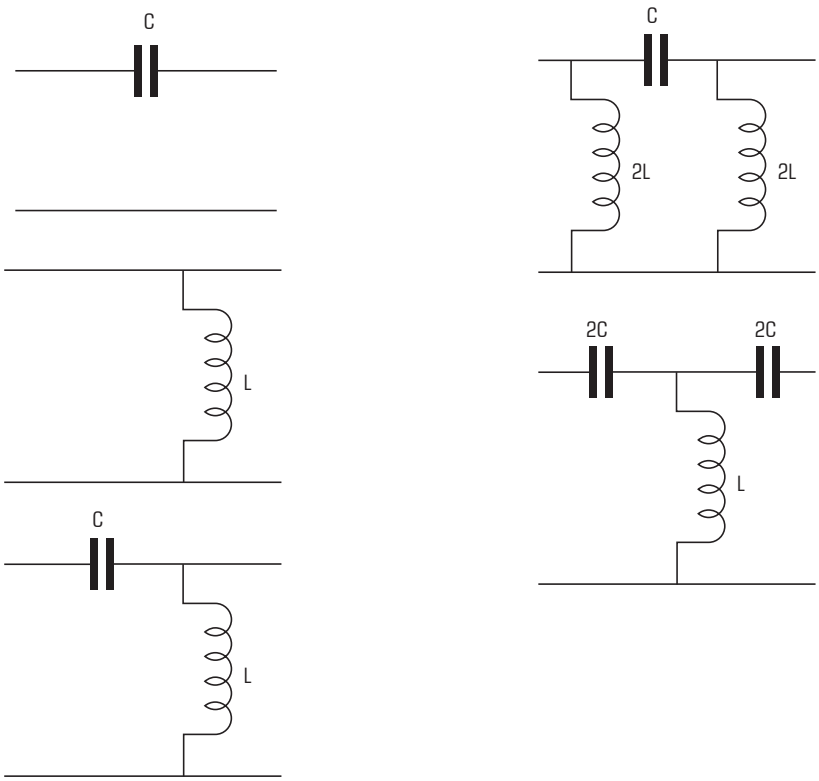


Figura 33.2: Filtros passa-alta passivos.

Os cálculos para filtros passa-alta passivos são derivados dos estudos de ressonância (ver Capítulo 8). Há muitas possibilidades de configuração. Vamos ver as mais simples, pois as mais complexas usam cálculos complicados.

Se você usar apenas um capacitor em série, basta usarmos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi Z_L C} \quad (33.1)$$

Onde Z_L é a impedância da carga conectada ao filtro (por exemplo, a impedância do alto-falante conectado ao filtro).

Se você usar apenas uma bobina em paralelo com a carga, basta usarmos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{Z_L}{2\pi L} \quad (33.2)$$

No caso de um filtro passa-alta formado por um capacitor em série e uma bobina em paralelo, usamos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (33.3)$$

No caso de um filtro usando mais componentes, é necessário saber a impedância característica (Z_o) do filtro, que é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (33.4)$$

A frequência de corte será dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (33.5)$$

Os valores de L e C não são arbitrados e precisam ser calculados da seguinte forma:

$$L = \frac{Z_0}{4\pi f} \quad (33.6) \qquad C = \frac{1}{4\pi f Z_0} \quad (33.7)$$

No caso do circuito usando duas bobinas em paralelo (circuito chamado "π"), o valor de cada bobina deverá ser duas vezes o valor calculado, enquanto que no caso do circuito usando dois capacitores em série (circuito chamado "T"), o valor de cada capacitor deverá ser duas vezes o valor calculado.

Filtros Passa-Alta Ativos

Há inúmeras possibilidades de construção de filtros passa-alta ativos usando um amplificador operacional, e apresentaremos apenas a mais simples, chamada topologia Sallen-Key – ver Figura 33.3. Nesta configuração, a frequência de corte será dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \tag{33.8}$$

Se os resistores possuírem o mesmo valor (R1 = R2) e os capacitores também (C1 = C2) – o que é recomendado para facilitar os cálculos –, podemos reduzir a equação acima para:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{33.9}$$

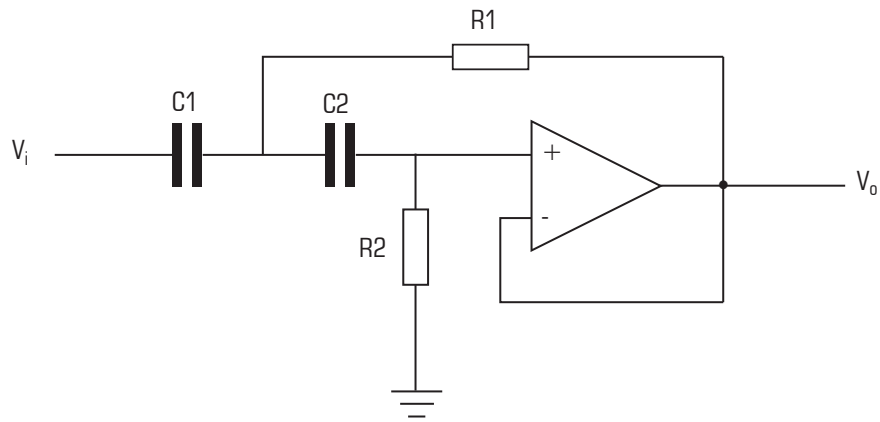


Figura 33.3: Filtro passa-alta ativo Sallen-Key.

É recomendado que os resistores tenham entre 10 kΩ e 100 kΩ.

Filtros Passa-Baixa

Como já explicado, os filtros passa-baixa bloqueiam frequências acima de uma determinada frequência (frequência de corte, representada como f nos cálculos a seguir), deixando passar frequências abaixo desta. Um exemplo de uso deste tipo de filtro é em conjunto com um woofer em caixas de som. Como o woofer reproduz somente sons graves (baixas frequências), um filtro passa-baixa cortará sons agudos (altas frequências), aumentando a eficiência do amplificador e melhorando a fidelidade do som. Este é o tipo de filtro usado nos estágios de filtragem de fontes de alimentação (ver Capítulo 31).

Filtros Passa-Baixa Passivos

Filtros passa-baixa passivos podem ser construídos de diversas formas, as mais comuns são mostradas na Figura 33.4. Como você pode ver, neste tipo de filtro, bobinas, caso existentes, são instalados em série à saída e capacitores, caso existentes, são instalados em paralelo à saída. Ou seja, a posição dos capacitores e bobinas é trocada em relação aos filtros passa-alta.

Os cálculos para filtros passa-baixa passivos são derivados dos estudos de ressonância (ver Capítulo 8). Há muitas possibilidades de configuração. Vamos ver as mais simples, pois as mais complexas usam cálculos complicados.

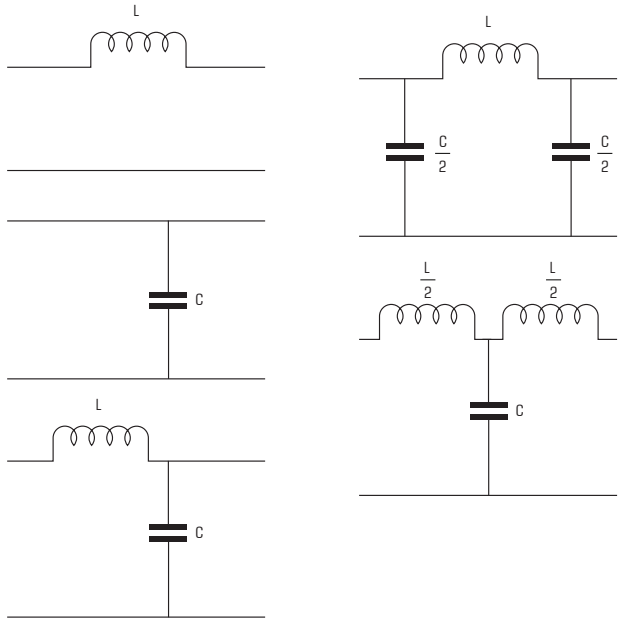


Figura 33.4: Filtros passa-baixa passivos.

Se você usar apenas uma bobina em série, basta usarmos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{Z_L}{2\pi L} \quad (33.10)$$

Onde Z_L é a impedância da carga conectada ao filtro (por exemplo, a impedância do alto-falante conectado ao filtro).

Se você usar apenas um capacitor em paralelo com a carga, basta usarmos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi Z_L C} \quad (33.11)$$

No caso de um filtro passa-baixa formado por uma bobina em série e um capacitor em paralelo, usamos a seguinte fórmula:

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (33.12)$$

No caso de um filtro usando mais componentes, é necessário saber a impedância característica (Z_o) do filtro, que é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (33.13)$$

A frequência de corte será dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (33.14)$$

Os valores de L e C não são arbitrados e precisam ser calculados da seguinte forma:

$$L = \frac{Z_0}{\pi f} \quad (33.15)$$

$$C = \frac{1}{\pi f Z_0} \quad (33.16)$$

No caso do circuito usando dois capacitores em paralelo (circuito chamado "π"), o valor de cada capacitor deverá ser metade do valor calculado, enquanto que no caso do circuito usando duas bobinas em série (circuito chamado "T"), o valor de cada bobina deverá ser metade do valor calculado.

Filtros Passa-Baixa Ativos

Há inúmeras possibilidades de construção de filtros passa-baixa ativos usando um amplificador operacional, e apresentaremos apenas a mais simples, chamada topologia Sallen-Key – ver Figura 33.5. Trata-se da mesma topologia do filtro passa-alta ativo, porém trocando a posição dos capacitores com a dos resistores. Os cálculos são os mesmos. Nesta configuração, a frequência de corte será dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}} \tag{33.17}$$

Se os resistores possuírem o mesmo valor (R1 = R2) e os capacitores também (C1 = C2) – o que é recomendado para facilitar os cálculos –, podemos reduzir a equação acima para:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{33.18}$$

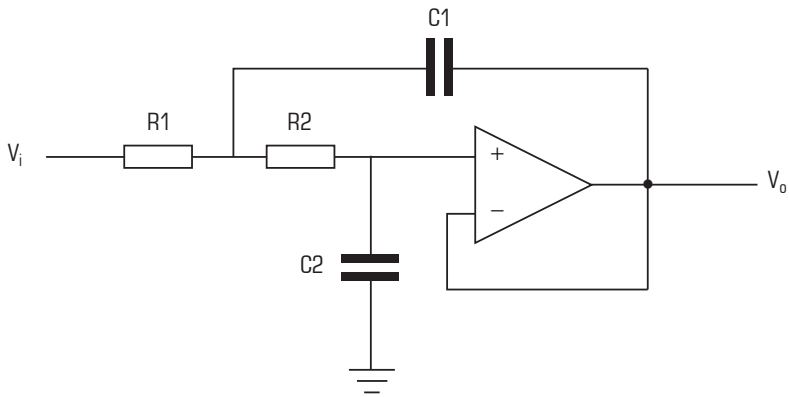


Figura 33.5: Filtro passa-baixa ativo Sallen-Key.

É recomendado que os resistores tenham entre 10 kΩ e 100 kΩ.

Filtros Passa-Faixa

Os filtros passa-faixa deixam passar uma determinada frequência ou uma faixa de frequências ao redor desta faixa. Exemplos de uso deste tipo de filtro incluem o circuito de sintonia de rádios e televisores e caixas de som onde queremos deixar passar somente uma determinada faixa de frequência para o alto-falante chamado mid-range, que reproduz somente frequências médias.

Filtros Passa-Faixa Passivos

Filtros passa-faixa passivos podem ser construídos de diversas maneiras. Na Figura 33.6 mostramos apenas os circuitos mais simples possíveis.

Filtros passa-faixa também são conhecidos como “bandpass”.

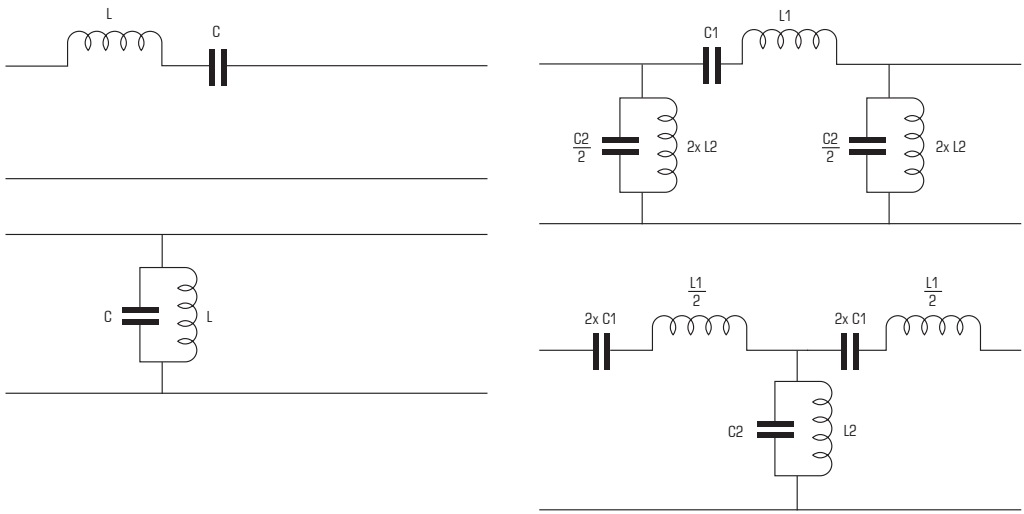


Figura 33.6: Filtros passa-faixa passivos.

A maneira mais fácil de se construir um filtro passa-faixa passivo é colocando uma bobina e um capacitor em série ou uma bobina e um capacitor em paralelo. Nesse caso, a frequência de passagem será a frequência de ressonância do circuito (ver Capítulo 8). Ou seja:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{33.19}$$

Nesses circuitos simples, no entanto, é possível configurar apenas uma frequência de passagem, e não uma faixa de frequência. As topologias "π" e "T", também apresentadas na Figura 33.6, permitem a configuração uma faixa de frequência a ser passada

Nos dois casos, os cálculos serão dados por:

$$L1 = \frac{Z_o}{\pi\,(f_2 - f_1)} \tag{33.20}$$

$$L2 = \frac{Z_o\,(f_2 - f_1)}{4\pi f_2 f_1} \tag{33.21}$$

$$C1 = \frac{f_2 - f_1}{4\pi f_2 f_1 Z_0} \tag{33.22}$$

$$C2 = \frac{1}{\pi\,(f_2 - f_1)Z_0} \tag{33.23}$$

$$f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2 \cdot C2}} \tag{33.24}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L1}{C2}} = \sqrt{\frac{L2}{C1}} \tag{33.25}$$

Onde f_2 e f_1 são a maior e a menor frequência da faixa passante, respectivamente.

Filtros Passa-Faixa Ativos

Há várias maneiras de se projetar um filtro passa-faixa ativo. Na Figura 33.7 vemos uma das diversas possibilidades.

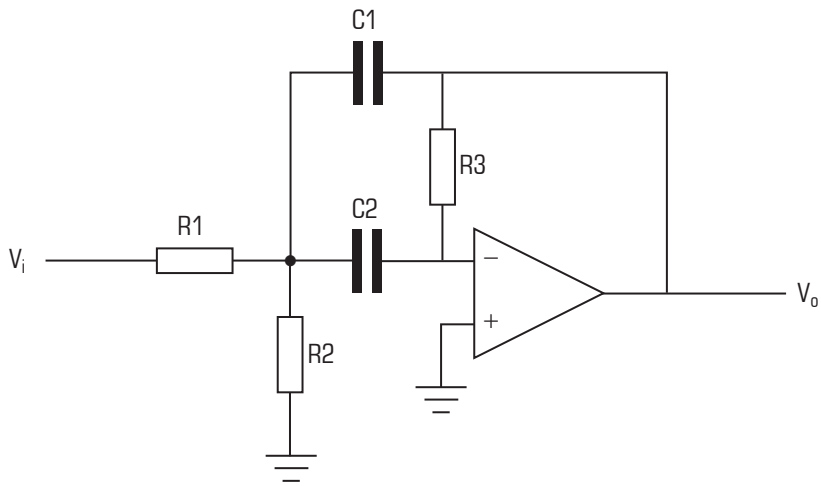


Figura 33.7: Filtro passa-faixa ativo.

Os dois capacitores devem ter o mesmo valor, ou seja, C1 = C2. Os resistores devem ser calculados usando as seguintes fórmulas:

$$f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \tag{33.26}$$

$$Q = \frac{f}{f_2 - f_1} \tag{33.27}$$

$$R1 = \frac{Q}{G 2\pi f C} \tag{33.28}$$

$$R2 = \frac{Q}{\left(2Q^2 - G\right) 2\pi f C} \tag{33.29}$$

$$R3 = \frac{2Q}{2\pi f C} \tag{33.30}$$

Onde f_2 é a frequência superior e f_1 é a frequência inferior da faixa de frequência que você quer deixar o circuito passar, e f é a frequência central. A distância entre f_1 e f_2 é chamada *largura de*

banda. Q é o fator de qualidade do filtro e G é o ganho pretendido para o circuito (recomenda-se um valor de, no máximo, 5).

Por exemplo, para um filtro passa-faixa onde queremos deixar passar de 9 kHz a 11 kHz, a frequência central será de 9950 kHz e o fator de qualidade (Q) será de 5. O circuito apresentado funciona melhor para fatores de qualidade de até 10.

Filtros Rejeita-Faixa

Como já explicado anteriormente, o filtro rejeita-faixa serve para eliminarmos uma determinada frequência do sinal. Um exemplo de uso deste tipo de circuito é como filtro de áudio, onde queremos eliminar um chiado ou zumbido que tem uma frequência conhecida. Um filtro rejeita-faixa complexo que elimina várias faixas de frequência é conhecido como filtro do tipo pente (*comb*).

Filtros Rejeita-Faixa Passivos

Assim como ocorre com os demais tipos de filtros, há várias maneiras de se construir filtros rejeita-faixa passivos. Na Figura 33.8 mostramos as mais simples.

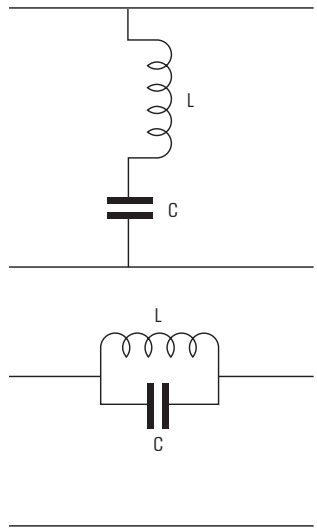


Figura 33.8: Filtros rejeita-faixa passivos (continua).

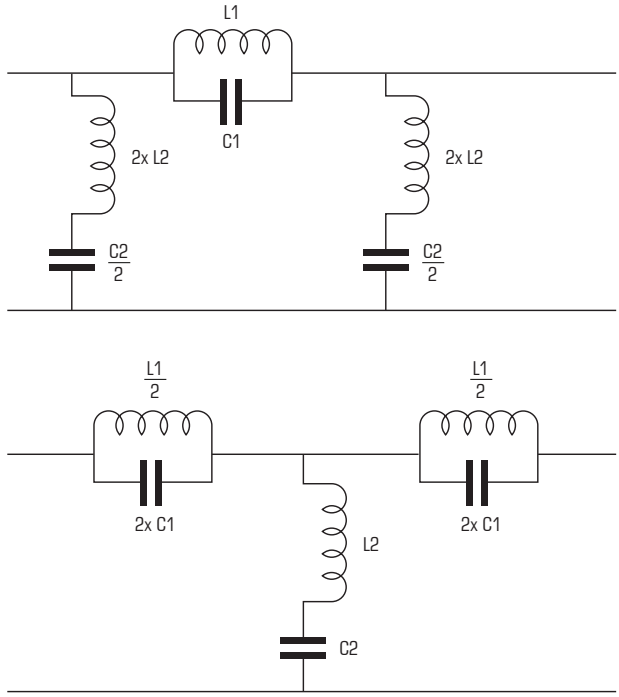


Figura 33.8: Filtros rejeita-faixa passivos (continuação).

Os dois primeiros filtros apresentados na Figura 33.8 funcionam fazendo com que o sinal seja cortado quando a frequência de ressonância é atingida. Dessa forma, a frequência de rejeição será dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{33.31}$$

As topologias "π" e "T", também apresentadas na Figura 33.8, permitem a configuração de uma faixa de frequência a ser passada.

Nos dois casos, os cálculos serão dados por:

$$L1 = \frac{Z_o}{\pi(f_2 - f_1)} \quad (33.32)$$

$$L2 = \frac{Z_o (f_2 - f_1)}{4\pi f_2 f_1} \quad (33.33)$$

$$C1 = \frac{f_2 - f_1}{\pi f_2 f_1 Z_o} \quad (33.34)$$

$$C2 = \frac{1}{\pi (f_2 - f_1) Z_o} \quad (33.35)$$

$$f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2 \cdot C2}} \quad (33.36)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L1}{C2}} = \sqrt{\frac{L2}{C1}} \quad (33.37)$$

Onde f_2 e f_1 são a maior e a menor frequência da faixa a ser bloqueada, respectivamente.

Filtros Rejeita-Faixa Ativos

Filtros rejeita-faixa ativos podem ser projetados das mais diferentes formas. Mostramos um dos circuitos mais simples na Figura 33.9.

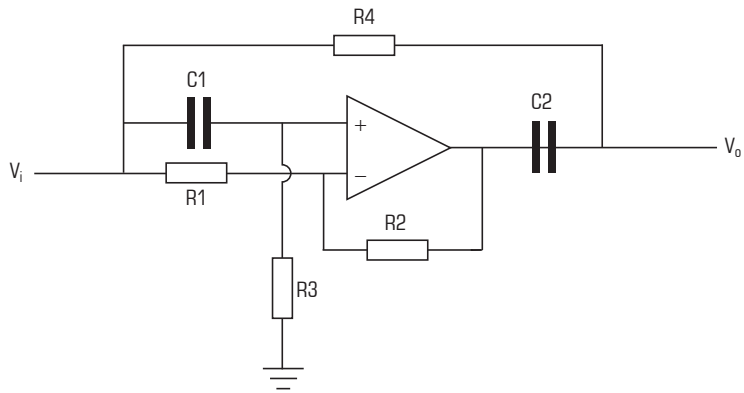


Figura 33.9: Filtro rejeita-faixa ativo.

As fórmulas para este circuito são:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{33.38}$$

$$R = R3 = R4 \tag{33.39}$$

$$C = C1 = C2 \tag{33.40}$$

E os resistores R1 e R2 devem ter o mesmo valor.

Um outro circuito interessante é da Figura 33.10, onde colocamos um potenciômetro para ajustar o fator de qualidade (Q) do filtro, isto é, através do potenciômetro podemos regular a faixa de frequência a ser rejeitada.

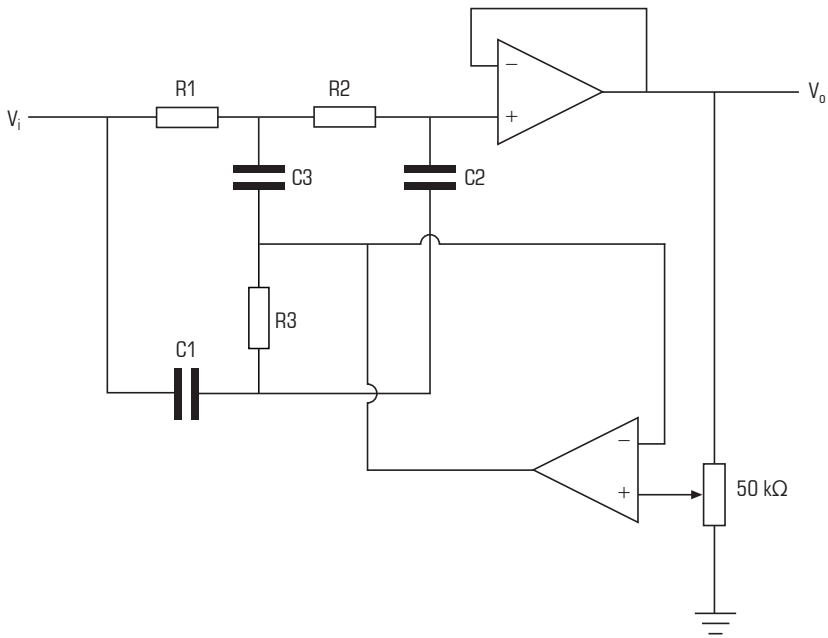


Figura 33.10: Filtro rejeita faixa ativo com controle do fator de qualidade.

Neste circuito, a fórmula da frequência central é:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{33.41}$$

E temos que R = R1 = R2, R3 = R/2, C = C1 = C2, e C3 = 2 · C.

◆◆◆

Exercícios

1. Construa um filtro para eliminar frequências acima de 800 Hz usando um filtro ativo baseado em amplificador operacional, usando resistores de 47 kΩ.
2. Considerando o projeto da caixa acústica da Figura 33.11, qual deverá ser o valor do capacitor e da bobina?

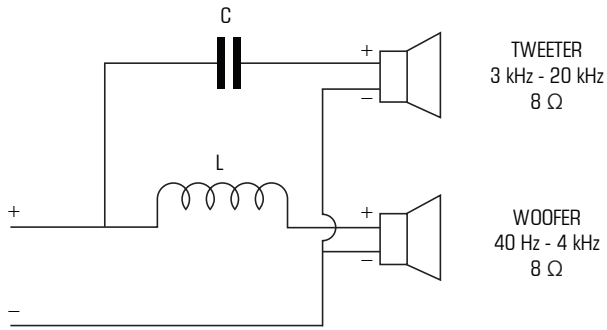


Figura 33.11: Projeto de caixa acústica.

3. Construa um filtro ativo usando amplificador operacional para eliminar um ruído de 60 Hz, sendo que os valores dos resistores foram dados: R1 = 10 kΩ, R2 = 10 kΩ, R3 = 68 kΩ e R4 = 68 kΩ.
4. Construa um filtro ativo usando amplificador operacional para deixar passar somente a faixa de 1 kHz a 3 kHz de uma forma de onda, com um ganho de 1 e capacitores de 22 nF. Apresente os valores comerciais mais próximos dos componentes calculados.
5. Construa um filtro ativo para rejeitar frequências abaixo de 10 kHz usando resistores de 12 kΩ.

Capítulo 34
Geradores de Formas de Onda

Introdução

Em várias ocasiões você precisará de circuitos que gerem determinados tipos de forma de onda, como forma de onda quadrada, retangular, triangular ou senoidal. Mostraremos agora como esses circuitos podem ser construídos e calculados.

Gerador de Onda Quadrada ou Retangular

Vimos, no Capítulo 30, como criar um gerador de forma de onda quadrada ou retangular usando o circuito integrado 555, configuração chamada *multivibrador astável*. O multivibrador astável clássico é formado por dois transistores, dois capacitores e quatro resistores (ver Figura 34.1), e você precisa conhecê-lo, mesmo que opte por utilizar um 555 em seus projetos, pois esse é um circuito considerado clássico.

Desenhamos capacitores polarizados na Figura 34.1, mas não necessariamente os capacitores a serem usados serão polarizados, isto dependerá dos valores dos capacitores.

A saída do circuito é feita no ponto marcado como Q. No ponto $\overline{Q}$ nós temos exatamente o inverso de Q, isto é, quando a saída Q está ativada, $\overline{Q}$ está desativada e vice-versa.

O tempo em que a saída Q ficará em baixo (0 V) (ou seja, saída $\overline{Q}$ em alto) será dado por:

$$t_0 = \ln(2) \cdot R2 \cdot C1 = 0{,}693 \cdot R2 \cdot C1 \qquad (34.1)$$

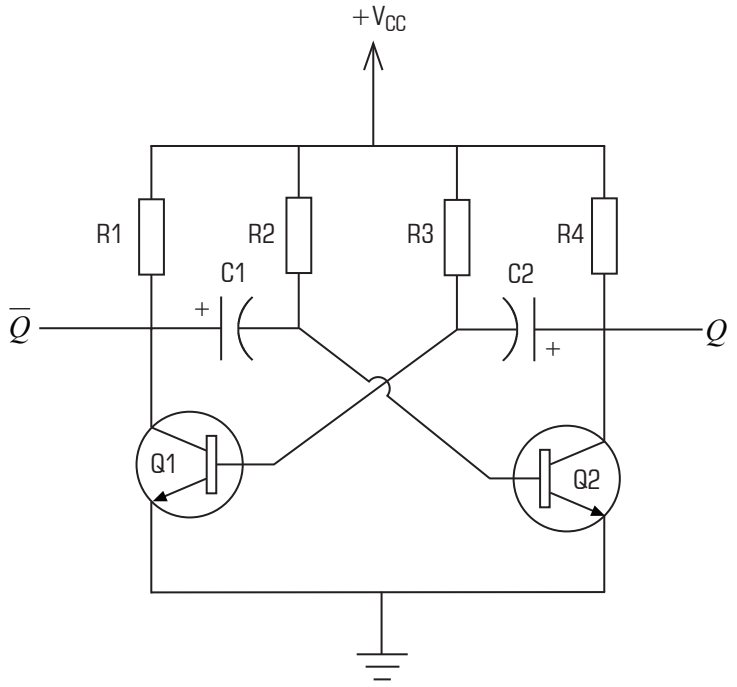


Figura 34.1: Multivibrador astável.

Já o tempo em que a saída $\overline{Q}$ ficará em alto ($+V_{CC}$) (ou seja, saída $\overline{Q}$ em baixo) será dado por:

$$t_1 = \ln(2) \cdot R3 \cdot C2 = 0{,}693 \cdot R3 \cdot C2 \qquad (34.2)$$

O período total (t) será dado por $t_0 + t_1$ e a frequência da forma de onda na saída pela fórmula clássica $f = 1/t$, ou seja, $f = 1 / (t_0 + t_1)$.

As fórmulas acima supõem que você estará montando um gerador de forma de onda retangular (isto é, o período em que a tensão da fica em "alto" é diferente do período em que a tensão da saída fica em "baixo"). Se você quiser montar um gerador de forma de onda quadrada, basta fazer com que R2=R3 e C1=C2, e a frequência será dada por:

$$f = \frac{1}{1{,}386RC} \qquad (34.3)$$

Você pode montar esse circuito com transistores BC547 e colocar um LED entre R4 e o coletor de Q2 (anodo conectado em R4 e o catodo ao coletor de Q2) e um LED entre R1 e o coletor de Q1 (anodo conectado em R1 e o catodo ao coletor de Q1). Outra maneira de "brincar" com este circuito é conectar a sua saída a um alto-falante. Experimente!

Um gerador de onda quadrada pode ser também construído usando um amplificador operacional, como vemos na Figura 34.2.

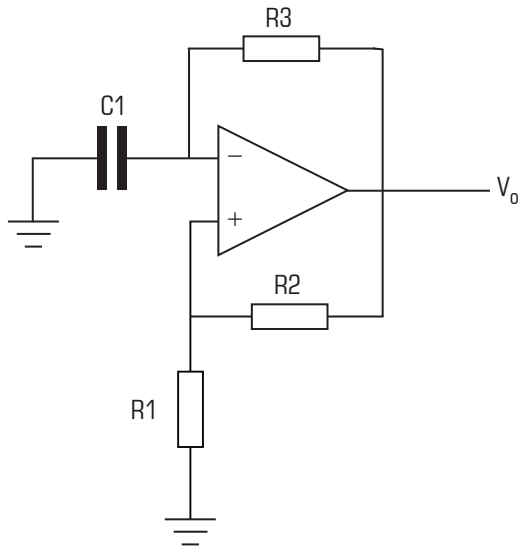


Figura 34.2: Gerador de onda quadrada usando um amplificador operacional.

O período total desse gerador é dada pela fórmula a seguir, e a frequência será obviamente o inverso do período (f = 1 / t).

$$t = 2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot R1}{R2} + 1\right) \quad (34.4)$$

Se o valor de R1 e R2 forem iguais, podemos simplificar a fórmula acima para:

$$t = 2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot \ln(3) = 2,2 \cdot R3 \cdot C1 \quad (34.5)$$

É importante lembrar que amplificadores operacionais são alimentados com uma tensão positiva e uma tensão negativa. Este circuito apresentará em sua saída uma forma de onda com valor de $+V_{CC}$ - 1,4 V quando em alto e $-V_{CC}$ + 1,4 V quando em baixo. Por exemplo, se o amplificador operacional for alimentado com 12 V, teremos em sua saída uma forma de onda quadrada variando entre +10,6 V e -10,6 V.

Gerador de Onda Triangular

O gerador de onda triangular pode ser feito através de um circuito chamado oscilador de relaxação usando um transistor unijunção. Este circuito e seus cálculos já foram apresentados no Capítulo 29. É também possível gerar uma forma de onda triangular a partir de um circuito chamado integrador, que converte uma forma de onda quadrada em triangular usando um amplificador operacional. Há algumas maneiras diferentes de se construir esse circuito; mostramos a mais simples possível na Figura 34.3. A vantagem desse circuito é que teremos duas saídas, uma com a forma de onda quadrada e outra com a forma de onda triangular.

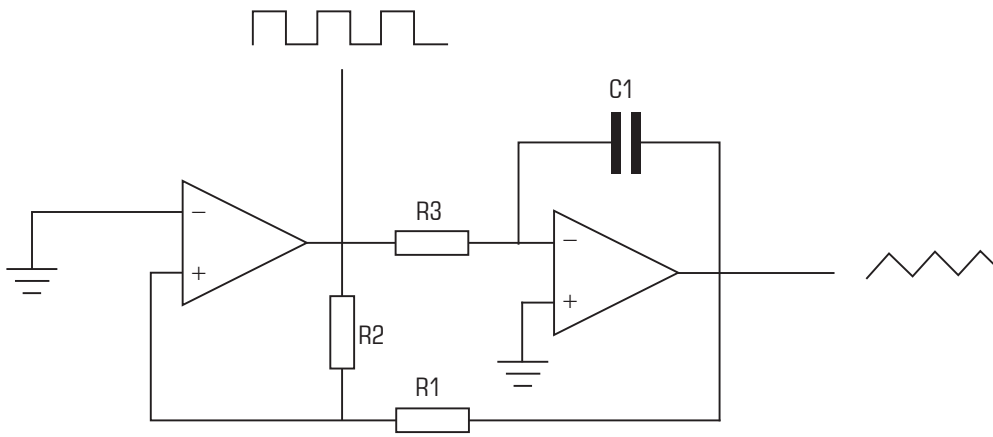


Figura 34.3: Gerador de onda triangular usando amplificadores operacionais.

A fórmula para obtermos a frequência da forma de onda na saída é:

$$f = \frac{1}{4 \cdot R3 \cdot C1} \cdot \left(\frac{R2}{R1}\right) \qquad (34.6)$$

É importante lembrar que amplificadores operacionais são alimentados com uma tensão positiva e uma tensão negativa. Este circuito apresentará em sua saída uma forma de onda com valor de $+V_{CC}$ - 1,4 V quando em alto e $-V_{CC}$ + 1,4 V quando em baixo. Por exemplo, se o amplificador operacional for alimentado com 12 V, teremos em sua saída uma forma de onda triangular variando entre +10,6 V e -10,6 V.

Uma maneira divertida de "brincar" com este circuito é conectar a sua saída a um alto-falante. Experimente!

Gerador de Onda Senoidal

A forma de onda senoidal também pode ser gerada com o uso de amplificadores operacionais. Existem uma infinidade de circuitos possíveis, na Figura 34.4 mostramos um relativamente simples. Neste circuito, o primeiro amplificador operacional gera uma forma de onda quadrada usando o circuito que vimos na Figura 34.3 com pequenas modificações, que é então "convertida" em senoidal pelo segundo amplificador operacional.

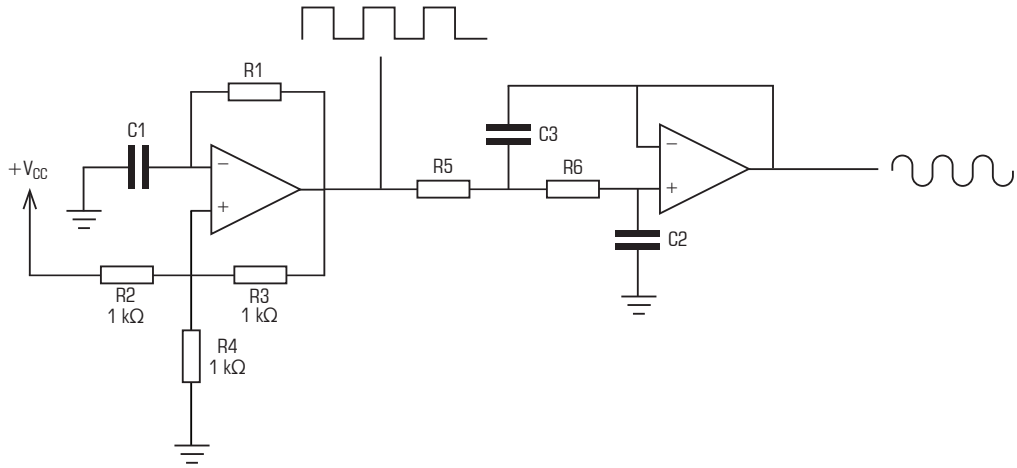


Figura 34.4: Gerador de onda senoidal usando amplificadores operacionais.

O valor de C1 é escolhido de forma arbitrária (isto é, você "chuta" o seu valor), os demais terão os seguintes valores (f é a frequência pretendida da forma de onda senoidal):

$$C2 = C1 \tag{34.7}$$

$$C3 = 2 \cdot C1 \tag{34.8}$$

$$R1 = \frac{1}{1{,}386 \cdot f \cdot C1} \tag{34.9}$$

$$R5 = \frac{1}{8{,}8856 \cdot f \cdot C1} \tag{34.10}$$

$$R6 = R5 \tag{34.11}$$

É importante lembrar que amplificadores operacionais são alimentados com uma tensão positiva e uma tensão negativa. Este circuito apresentará em sua saída uma forma de onda com valor de $+V_{CC}$ - 1,4 V quando em seu pico máximo e $-V_{CC}$ + 1,4 V quando em seu pico mínimo. Por exemplo, se o amplificador operacional for alimentado com 12 V, teremos em sua saída uma forma de onda senoidal variando entre +10,6 V e -10,6 V.

Uma maneira divertida de "brincar" com este circuito é conectar a sua saída a um alto-falante. Experimente!

Gerador de Funções

Um gerador de funções é um aparelho capaz de gerar diversos tipos de forma de onda com diversas frequências, normalmente contendo um botão de seleção da forma de onda pretendida (senoidal, triangular ou quadrada) e um botão de ajuste de frequência.

Você pode comprar este instrumento pronto, ou então você pode construir o seu próprio gerador de funções. Não deixa de ser um projeto bastante interessante. Você pode montar um aparelho contendo os circuitos já apresentados anteriormente, ou então usar um circuito integrado já pronto para essa função, como o XR2206, que é um componente no formato DIP de 16 pinos (um circuito integrado chamado 8038 já foi bastante popular, porém ele não é mais fabricado). Na Figura 34.5 mostramos um gerador de funções baseado neste circuito integrado.

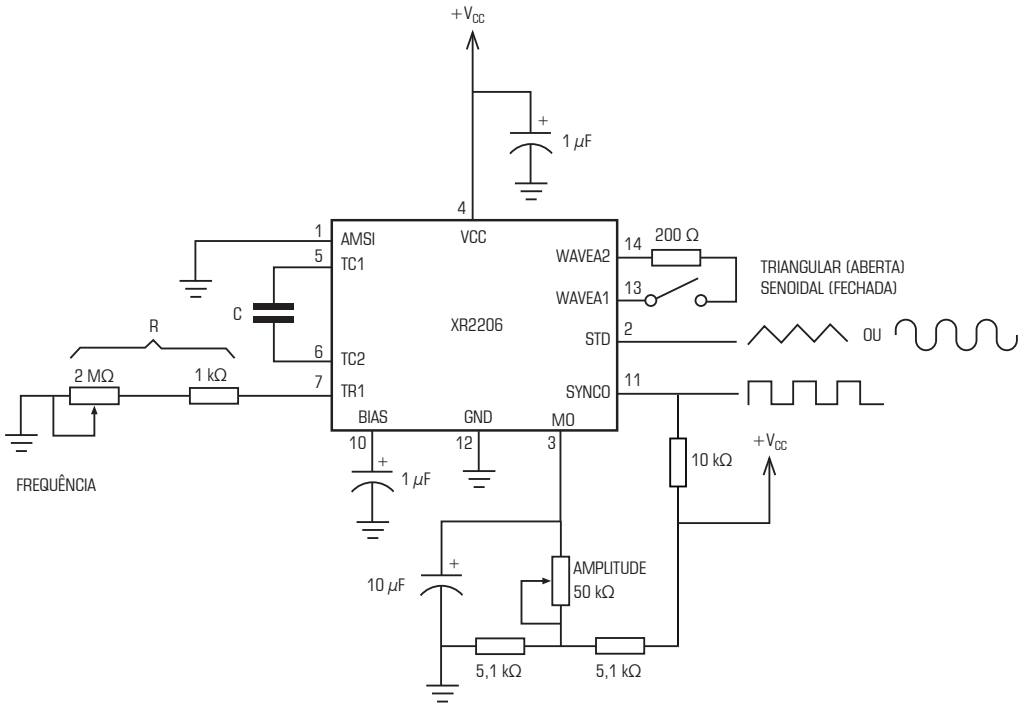


Figura 34.5: Gerador de funções.

A frequência será dada por:

$$f = \frac{1}{RC} \tag{34.12}$$

No circuito apresentado, você deverá arbitrar o valor de C (que deverá ter entre 1 nF e 100 μF), e o valor de R é controlado através do potenciômetro existente. Por exemplo, se você usar um capacitor de 10 nF, teremos uma frequência mínima de 50 Hz e máxima de 100 kHz, dependendo da posição do potenciômetro.

◆◆◆

Exercícios

1. Qual é a frequencia da forma de onda de um multivibrador astável tradicional onde R1 = R4 = 270 Ω, R2 = R3 = 1 kΩ e C1 = C2 = 1 μF?
2. Construa um gerador de onda quadrada de 1 kHz usando o circuito da Figura 34.2 onde C1 = 220 nF.
3. Construa um gerador de onda senoidal de 12 kHz usando o circuito da Figura 34.4 onde C1 = 1 nF.

Apêndice

Desenvolvimento dos exercícios propostos

Capítulo 1

1. **Converta 0,00047 F para μF.**

   $0{,}00047\ \text{F} = 470 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 470\ \mu\text{F}$

2. **Converta 0,145 A para mA.**

   $0{,}145\ \text{A} = 145 \cdot 10^{-3}\ \text{A} = 145\ \text{mA}$

3. **Converta 22000 Ω para kΩ.**

   $22000\ \Omega = 22 \cdot 10^{3}\ \Omega = 22\ \text{k}\Omega$

4. **Converta 350 mW para W.**

   $350\ \text{mW} = 350 \cdot 10^{-3}\ \text{W} = 0{,}35\ \text{W}$

5. **Converta 22 pF para F.**

   $22\ \text{pF} = 220 \cdot 10^{-12} = 0{,}000\ 000\ 000\ 22\ \text{F}$

6. **Converta 0,000000047 F para nF.**

   $0{,}000\ 000\ 047\ \text{F} = 470 \cdot 10^{-9}\ \text{F} = 47\ \text{nF}$

7. **Converta $5{,}6 \cdot 10^{5}$ Ω para kΩ.**

   $5{,}6 \cdot 10^{5}\ \Omega = 560 \cdot 10^{3}\ \Omega = 560\ \text{k}\Omega$

8. Converta $4{,}7 \cdot 10^{-7}$ F para nF.

$4{,}7 \cdot 10^{-7}\ \text{F} = 470 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 470\ \mu\text{F}$

9. Converta $5{,}8 \cdot 10^{-1}$ W para mW.

$5{,}8 \cdot 10^{-1}\ \text{W} = 580 \cdot 10^{-3}\ \text{W} = 580\ \text{mW}$

10. Converta 330 μF para representação em potência de dez.

$330\ \mu\text{F} = 330 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 33 \cdot 10^{-5}\ \text{F} = 3{,}3 \cdot 10^{-4}\ \text{F}$

11. Converta 35 kΩ para representação em potência de dez.

$35\ \text{k}\Omega = 35 \cdot 10^{3}\ \Omega = 3{,}5 \cdot 10^{4}\ \Omega$

12. Arredonde o resultado de 120 / 54 para uma casa decimal.

$120 / 54 = 2{,}2\overline{2} = 2{,}2$

13. Arredonde o resultado de 58 / 2,3 para duas casas decimais.

58 / 2,3 = 25,217391304347826086956521739 13... = 25,22

14. Transforme 4,46 em um número inteiro (isto é, sem casas decimais).

4,46 = 4,5 = 4 (pois 4 é par)

15. Transforme 5,46 em um número inteiro (isto é, sem casas decimais).

5,46 = 5,5 = 6 (pois 5 é impar)

Capítulo 2

1. Analise o circuito da Figura 2.19 e diga o que ele faz.

Uma lâmpada ligada à tomada elétrica com uma chave liga/desliga – um abajur!

2. Analise o circuito da Figura 2.20 e diga o que ele faz.

Através da posição da chave existente, você seleciona qual dos dois LEDs será aceso.

Capítulo 3

1. Elétrons possuem carga elétrica negativa**.**

2. O movimento de elétrons produz uma corrente elétrica**.**

3. A unidade de medida de carga elétrica é o Coulomb**.**

4. A oposição à passagem de corrente elétrica é chamada resistência elétrica**.**

5. Um material é chamado condutor quando tem muitos ou poucos elétrons livres em seu interior?

Muitos.

6. Um material é chamado isolante quando tem muitos ou poucos elétrons livres em seu interior?

Poucos.

Capítulo 4

1. Qual é a tensão elétrica total de duas baterias de 9 V conectadas em paralelo?

9 V (em paralelo as tensões não são somadas)

2. Qual é a tensão elétrica total de duas baterias de 9 V conectadas em série?

9 V + 9 V = 18 V (em série as tensões são somadas)

3. O que acontece se você pegar uma fonte de alimentação com várias saídas e usar a saída rotulada como +12 V como sendo o pólo positivo para alimentar um circuito e a saída rotulada como +5 V como sendo o pólo negativo para alimentar o mesmo circuito?

Você terá uma fonte de alimentação de 7 V (12 V - 5 V).

4. O que acontece se você pegar uma fonte de alimentação com várias saídas e usar a saída rotulada como -12 V como sendo o pólo positivo para alimentar um circuito e a saída rotulada como 5 V como sendo o pólo negativo para alimentar o mesmo circuito?

Você terá uma fonte de alimentação de -17 V (-12 V - 5 V).

5. Em dois componentes conectados em série, a corrente será a mesma nos dois componentes.

6. Em dois componentes conectados em paralelo, a tensão será a mesma nos dois componentes.

Capítulo 5

1. Qual é a tensão de pico de uma rede elétrica de 220 V?

$$V_p = V_{RMS} \cdot \sqrt{2} = 220\,V \cdot \sqrt{2} = 311{,}1269\ldots V \approx 311\,V$$

2. Qual é a tensão eficaz de uma forma de onda senoidal de 12 Vpp?

$$V_p = \frac{V_{pp}}{2} = \frac{12\,V}{2} = 6\,V$$

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4{,}2426\ldots V \approx 4{,}24\,V$$

3. Qual é o período de uma forma de onda alternada de 30 KHz (30.000 Hz)?

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{30.000} = 3,\overline{3} \cdot 10^{-5} = 33,\overline{3} \cdot 10^{-6} = 33,\overline{3}\ \mu s$$

4. Qual é a frequência de uma forma de onda alternada com ciclo de 100 μs (0,0001 s)?

$$T = \frac{1}{f} \therefore f = \frac{1}{T} = \frac{1}{100\mu s} = \frac{1}{10^{-4}} = 10^4 = 10 \cdot 10^3 = 10\ kHz$$

5. Qual é a duração um semiciclo de uma forma de onda senoidal de 1 kHz (1.000 Hz)?

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1\ kHz} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} = 1\ ms$$

$$semiciclo = \frac{T}{2} = \frac{1\ ms}{2} = 0,5\ ms = 500\,\mu s$$

6. Qual é a frequência de uma forma de onda senoidal onde cada semiciclo dura 5 ms (0,005 s)?

$$T = semiciclo \cdot 2 = 5\ ms \cdot 2 = 10\ ms$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\ ms} = \frac{1}{10^{-2}} = 10^2 = 100\ Hz$$

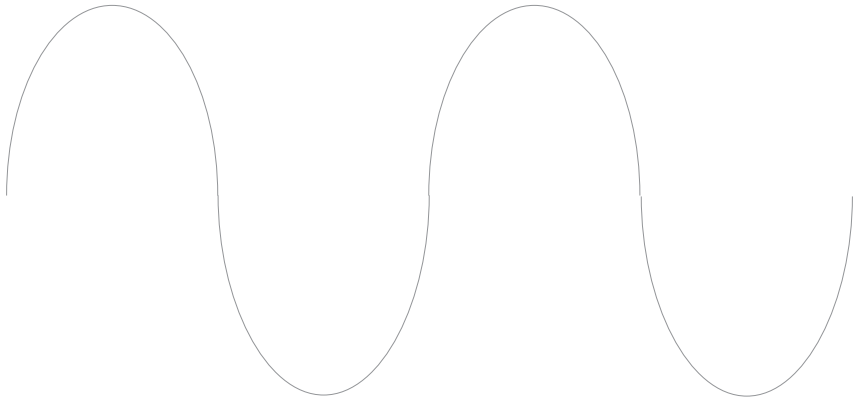
7. Qual é a tensão média de uma forma de onda retangular com ciclo de carga de 70% cuja tensão de pico é de 24 V?

$$tensão\ média = V_p \cdot ciclo\ de\ carga = 24\ V \cdot 70\% = 24 \cdot 0,7 = 16,8\ V$$

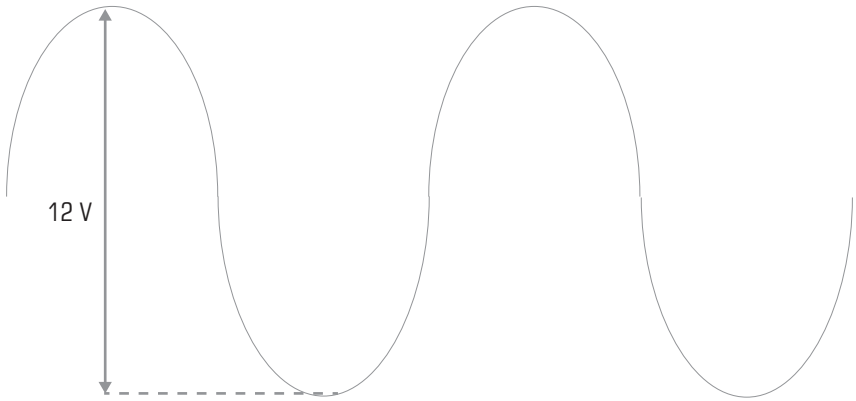
8. Qual é o "offset DC" (ou seja, tensão média) de uma forma de onda senoidal com tensão de pico-a-pico de 12 V e tensão de pico máxima de 36 V?

A maneira mais fácil de entender questões como essa é desenhar o que está sendo proposto. Explicamos a seguir o passo a passo.

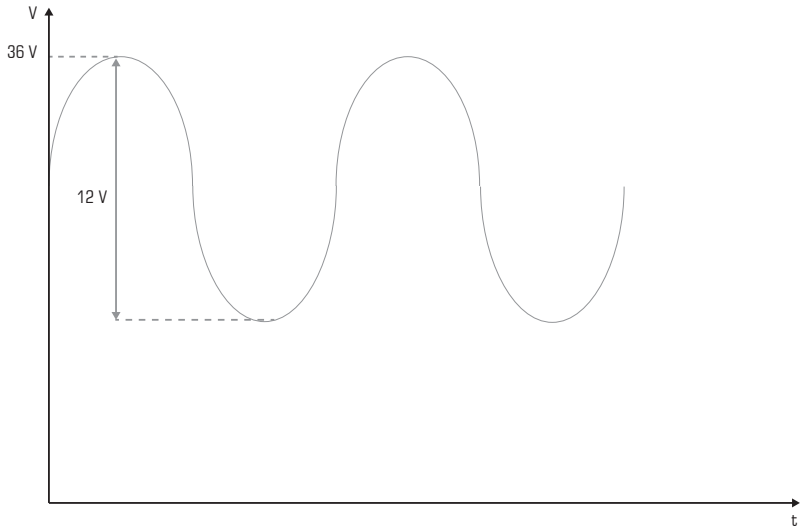
Passo 1: O exercício indica uma forma de onda senoidal. Portanto, desenhe uma forma de onda senoidal.



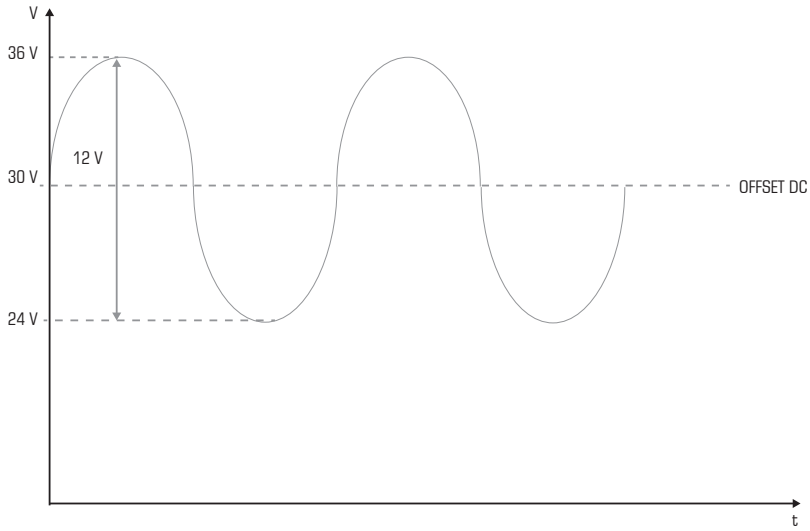
Passo 2: o exercício indica que esta forma de onda tem uma tensão de pico a pico de 12 V. Indique isso.



Passo 3: o exercício indica que a tensão de pico máxima é de 36 V. Isso significa que a distância entre o pico máximo e o eixo *x* (zero volt) é de 36 V. Desenhe isso.



Passo 4: a questão é sobre o offset DC desta forma de onda, isto é, sobre qual tensão DC "fixa" a forma de onda está flutuando. Esta tensão é o "centro" (no eixo *y*) da forma de onda. Como a tensão de pico a pico da forma de onda é de 12 V e o pico máximo é de 36 V, o pico mínimo será de 24 V (36 V – 12 V). Com isso, temos que essa forma de onda flutua sobre uma tensão contínua de 30 V, que é o "centro". Em outras palavras, neste caso o offset DC será a tensão de pico máxima (36 V) menos a tensão de pico da onda senoidal (6 V, que é a metade da tensão de pico a pico), ou seja, 30 V.

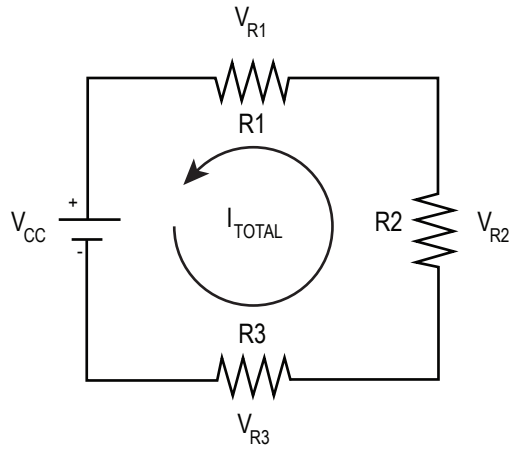


Capítulo 6

1. Em dois componentes conectados em série, a corrente será a mesma nos dois componentes.

2. Em dois componentes conectados em paralelo, a tensão será a mesma nos dois componentes.

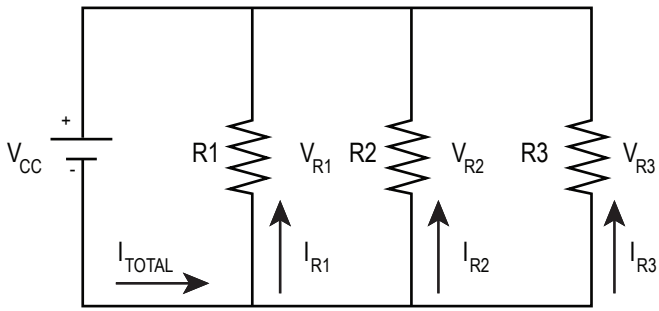
3. No circuito da Figura 6.6, qual é o valor da corrente que circula por R2?
A corrente em resistores em série é sempre a mesma. Como somente há três resistores em série no circuito e nenhum outro componente, a corrente que circulará nos três resistores será a mesma, sendo a corrente total do circuito. A corrente total do circuito pode ser descoberta aplicando-se a equação da Lei de Ohm (4.2) diretamente:



$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{TOTAL} = \frac{V_{CC}}{R_{TOTAL}} = \frac{V_{CC}}{(R1 + R2 + R3)}$$

4. No circuito da Figura 6.7, qual é o valor da corrente que circula por R2?

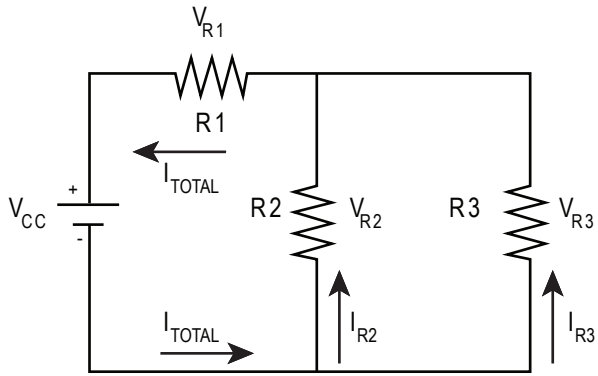
Agora temos três resistores em paralelo e, portanto, a tensão sobre os três será a mesma. Como não há nenhum outro componente no circuito, a tensão sobre os três resistores é a tensão da fonte de alimentação. A corrente que circula por R2 pode ser calculada aplicando-se a equação da Lei de Ohm (4.2) diretamente:



$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{V_{CC}}{R2}$$

5. No circuito da Figura 6.8, qual é o valor da corrente que circula por R2?

Agora há uma mistura de resistores em série e paralelo, e você deve tomar cuidado, pois agora R2 não está em paralelo com a fonte de alimentação e, portanto, a tensão sobre ele não é a tensão da fonte, nem tampouco a corrente sobre ele é a corrente total do circuito, visto que a corrente será dividida entre ele e R3. A corrente que circula por R2 pode ser calculada aplicando-se a equação da Lei de Ohm (4.2) diretamente:

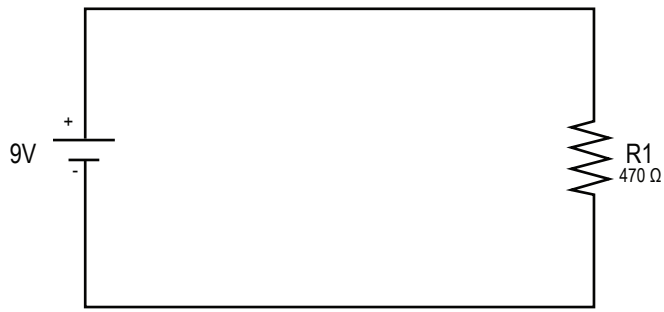


$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R2}$$

Capítulo 7

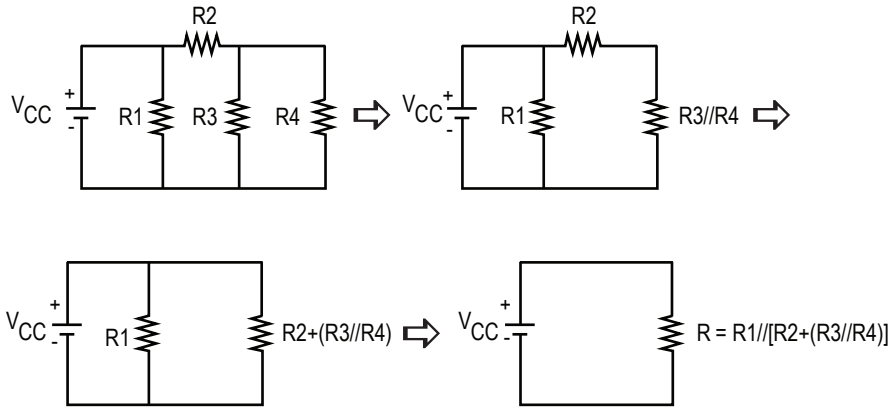
1. Qual é o valor da tensão sendo aplicada sobre R1 na Figura 7.8? E qual é o valor da corrente que passa em R1?

Como não há nenhum outro componente no circuito, a tensão sendo aplicada sobre R1 é a tensão da fonte de alimentação (9 V), enquanto que a corrente será a corrente total do circuito:



$$I = \frac{V}{R} = \frac{9\,V}{470\,\Omega} = 0,0191489\ldots \approx 19,15\,mA$$

2. Considere o circuito anteriormente apresentado na Figura 7.7. Calcule a resistência equivalente deste circuito considerando R1 = 470 Ω, R2 = 3,3 kΩ, R3 = 220 Ω e R4 = 1 kΩ.



Este exercício é relativamente fácil pois a maneira de calcular a resistência equivalente deste circuito foi apresentada na própria Figura 7.7. Você só não pode se esquecer de converter os valores em kΩ em ohms para poder executar os cálculos.

O desenvolvimento é como se segue:

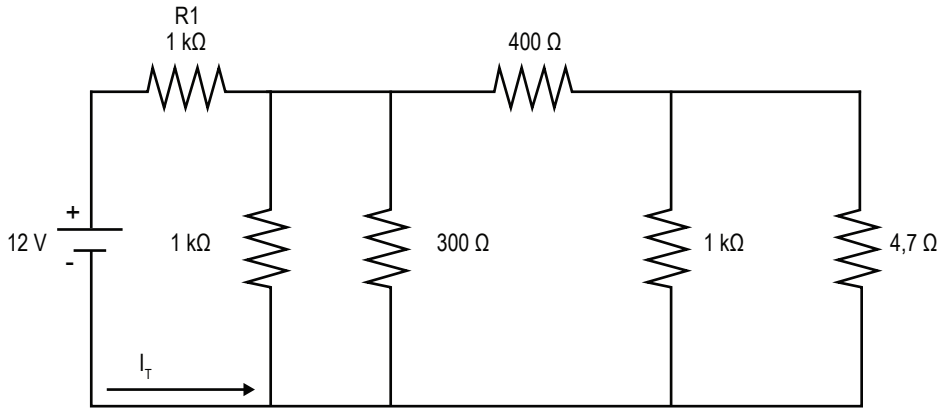
$$R_{EQ} = R1 \,//\, \left[R2 + \left(R3 \,//\, R4\right)\right]$$

$$R3 \,//\, R4 = \frac{R3 \cdot R4}{R3 + R4} = \frac{220 \cdot 1000}{220 + 1000} = \frac{220000}{1220} = 180{,}33\,\Omega$$

$$R_{EQ} = R1 \,//\, \left[3300 + 180{,}33\right] = R1 \,//\, 3480{,}33 = \frac{470 \cdot 3480{,}33}{470 + 3480{,}33} =$$

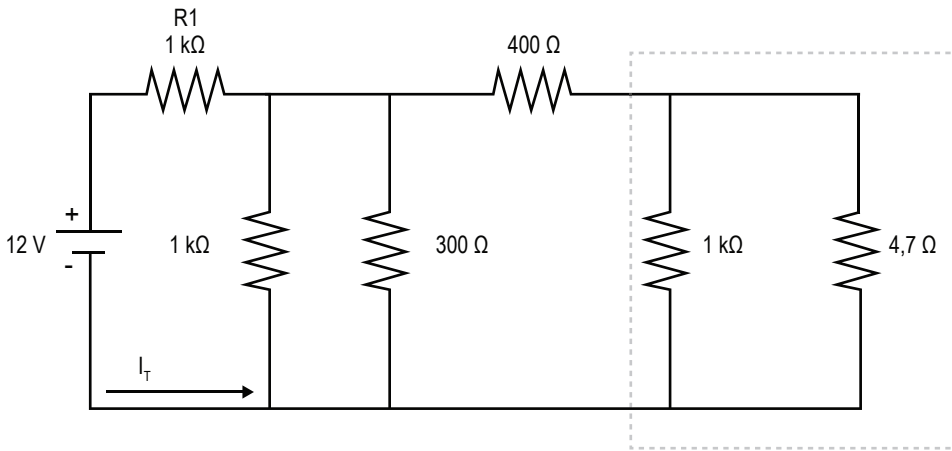
$$= \frac{1635755{,}1}{3950{,}33} = 414{,}08\,\Omega \approx 414\,\Omega$$

3. Qual é o valor da corrente I_T consumida pelo circuito abaixo?

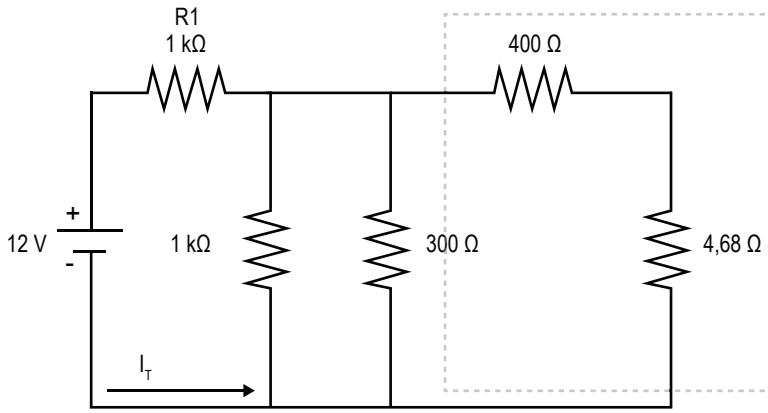


A corrente total pode ser facilmente descoberta aplicando-se a equação da Lei de Ohm (4.2), onde *V* será a tensão da fonte de alimentação e *R* será a resistência equivalente do circuito. Como a tensão da fonte é dada, resta descobrir o valor da resistência equivalente. Em exercícios deste tipo, você deve começar o cálculo da resistência equivalente pelo ponto mais distante da fonte de alimentação.

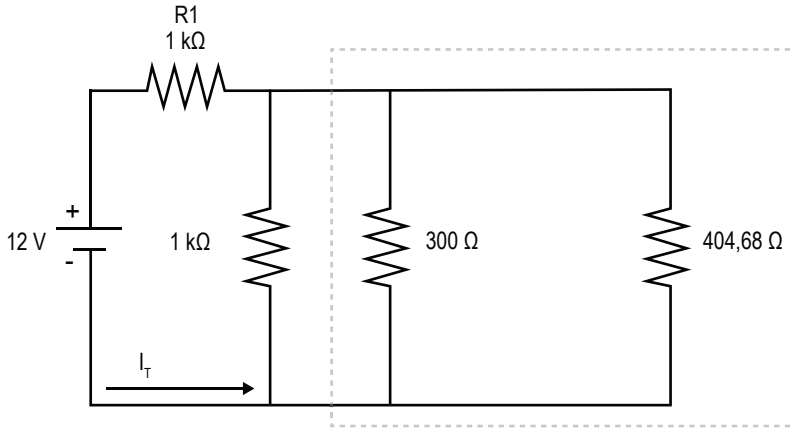
O desenvolvimento deste exercício, de forma bem detalhada, é o que se segue.



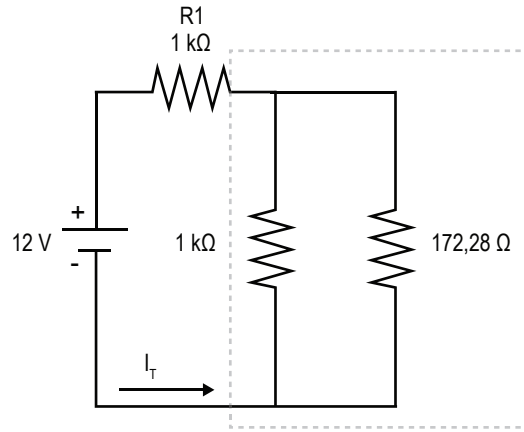
$$R_{EQ} = \frac{1000 \cdot 4,7}{1000 + 4,7} = \frac{4700}{1004,7} \approx 4,68\,\Omega$$



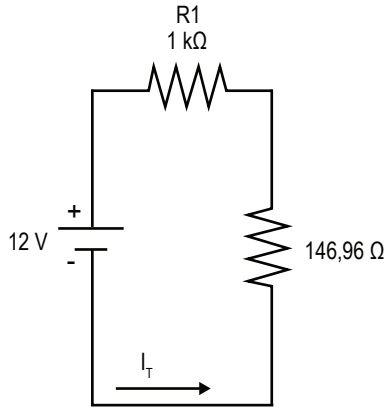
$$R_{EQ} = 400 + 4,68 = 404,68\,\Omega$$



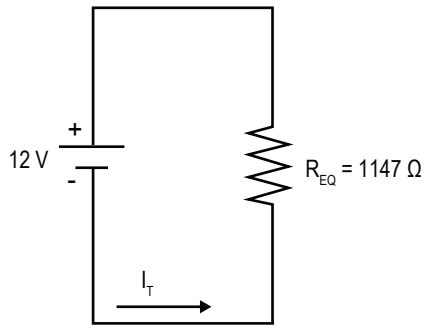
$$R_{EQ} = \frac{300 \cdot 404,68}{300 + 404,68} = \frac{121404}{704,68} = 172,28\,\Omega$$



$$R_{EQ} = \frac{1000 \cdot 172,28}{1000 + 172,28} = \frac{172280}{1172,28} = 146,96\Omega$$

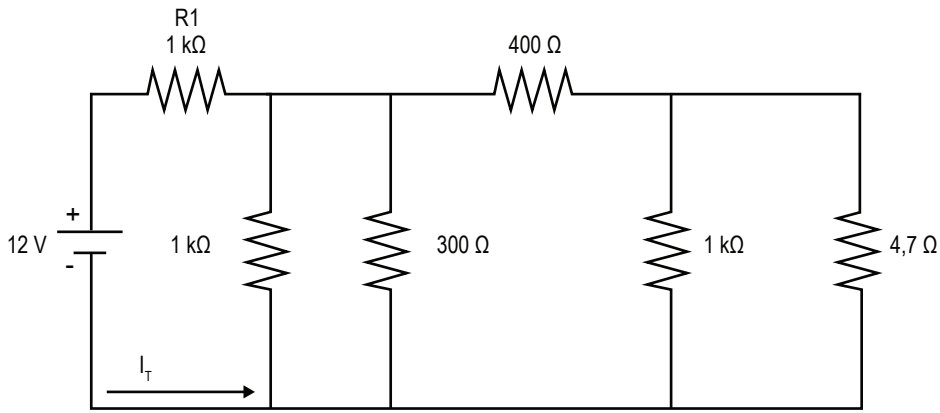


$$R_{EQ} = 1000 + 146{,}96 = 1146{,}96\,\Omega = 1147\,\Omega$$



$$I_T = \frac{V}{R_{EQ}} = \frac{12V}{1147\Omega} = 0{,}01046 = 10{,}46\ mA$$

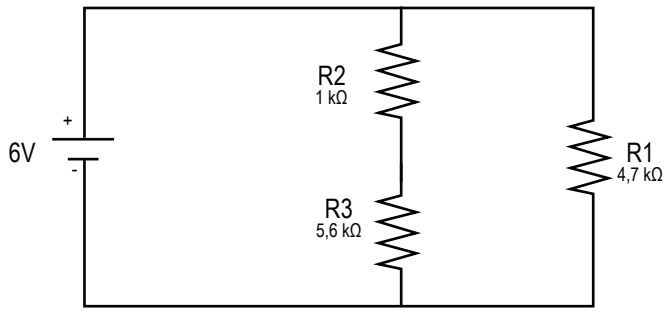
4. Qual é o valor da tensão que está sendo aplicada sobre R1 na Figura 7.9?



Este circuito é o mesmo da questão 3. Pela Primeira Lei de Kirschhoff (Lei dos Nós, ver página 66), a corrente que circula por R1 é a corrente total do circuito, que já foi calculada na questão anterior. Desta forma, temos todos os elementos para calcular a tensão sobre R1 utilizando diretamente a equação da Lei de Ohm (4.3) (não se esqueça de converter kΩ para ohms e mA para ampères para poder aplicar a equação):

$$V = R \cdot I \therefore V_{R1} = R1 \cdot I_{R1} = 1000 \cdot 0{,}01046 = 10{,}46\ V$$

5. Qual é o valor da tensão que está sendo aplicada sobre R3 na Figura 7.10?



Com o conhecimento demonstrado até o momento no livro, precisamos saber a corrente que circula por R3 para podermos calcular a tensão sendo aplicada sobre ele. Esta corrente será a mesma que circula por R2, pois R2 e R3 estão em série.

Há duas maneiras de se descobrir essa corrente. Você pode descobrir a corrente total do circuito e diminuir desta o valor da corrente que circula por R1, já que pela Primeira Lei de Kirschhoff (Lei dos Nós, ver página 66) temos:

$$I_{R3} = I_{R2} = I_{TOTAL} - I_{R1}$$

Só que isso envolverá descobrirmos a resistência total do circuito e a corrente que circula sobre R1.

Um caminho mais simples é observar que a fonte de alimentação está em paralelo com os resistores R2 + R3, ou seja, a tensão aplicada sobre R2 + R3 é a tensão da fonte. Logo temos que:

$$I = \frac{V}{R} \therefore I_{R3} = \frac{V}{(R2 + R3)} = \frac{6}{(1000 + 5600)} = \frac{6}{6600} = 0{,}000909\,A = 909\,\mu A$$

A tensão sobre R3 será, portanto:

$$V = R \cdot I \therefore V_{R3} = R3 \cdot I_{R3} = 5{,}6\,k\Omega \cdot 909\mu A = 5600 \cdot 0{,}00090 = 5{,}0904V \approx 5{,}1\,V$$

Capítulo 8

1. **Em um circuito de tensão contínua, a impedância é igual à:**

   Resistência do circuito.

2. **Qual é o valor da reatância indutiva de qualquer bobina ligada em um circuito de tensão contínua?**

   Zero.

3. Qual é o valor da reatância capacitiva de qualquer capacitor ligado em um circuito de tensão contínua?

Infinito.

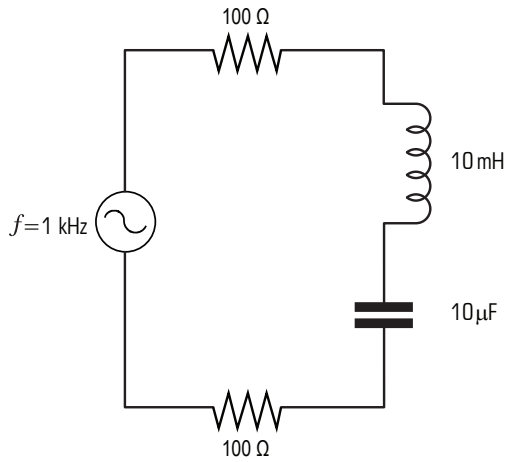
4. Se quisermos projetar um filtro passa-faixa ajustado na frequência de 1 kHz usando uma bobina de 100 mH em paralelo com um capacitor, qual deverá ser o valor desse capacitor?

Neste caso, trata-se de um circuito LC paralelo como na Figura 8.3 com uma frequência de ressonância de 1 kHz. A ressonância ocorre quando $X_L = X_C$. Como temos todos os valores menos o de C:

$$X_L = X_C \therefore 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \therefore 2\pi fLC = \frac{1}{2\pi f} \therefore C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} =$$

$$= \frac{1}{4\pi^2 \cdot 1000^2 \cdot 0,1} = \frac{1}{3947841,76} = 2,533 \cdot 10^{-7} = 253,3 \text{ nF}$$

5. Qual é a impedância do circuito abaixo (encontre o resultado também em coordenada polar)?



$$f = 1\,kHz = 10^3\,Hz$$

$$L = 10\,mH = 10^{-2}\,H$$

$$C = 10\,\mu F = 10^{-5}\,F$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-2} = 62{,}83\,\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-5}} = 15{,}91\,\Omega$$

$$X = X_L - X_C = 62{,}83 - 15{,}91 = 46{,}92\,\Omega$$

$$R = 100\,\Omega + 100\,\Omega = 200\,\Omega$$

$$Z = R \pm jX = 200 \pm j46{,}92\,\Omega$$

Em coordenada polar:

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{(46,92)^2 + (200)^2} = \sqrt{(2201,4864 + 40000)} =$$

$$= \sqrt{42201,4864} = 205,43\,\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = \arctan\left(\frac{46,92}{200}\right) = \arctan(0,2346) = 13,2028 = 13,20^\circ$$

Como explicamos, a operação de arcotangente é apresentada em calculadoras científicas como tan-1. Na calculadora do Windows, você deve entrar o valor, clicar no botão Inv, e aí o botão tan se transforma em tan-1.

5. Qual é a frequência de ressonância do circuito acima?

A ressonância é obtida quando $X_L = X_C$. Você pode usar a equação 8.4.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-2} \cdot 10^{-5}}} = \frac{1}{0,0019869} = 503,29\,Hz$$

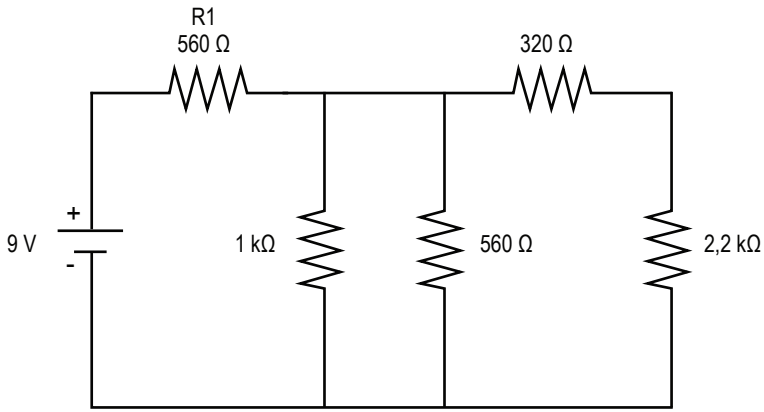
Caso você não tenha compreendido como chegamos a esta equação, fazemos o seu desenvolvimento abaixo:

$$X_L = X_C \therefore 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \therefore f^2 = \frac{1}{2^2\pi^2 LC} \therefore f = \sqrt{\left(\frac{1}{2^2\pi^2 LC}\right)} =$$

$$= \left(\frac{\sqrt{1}}{\sqrt{\left(2^2\pi^2 LC\right)}}\right) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

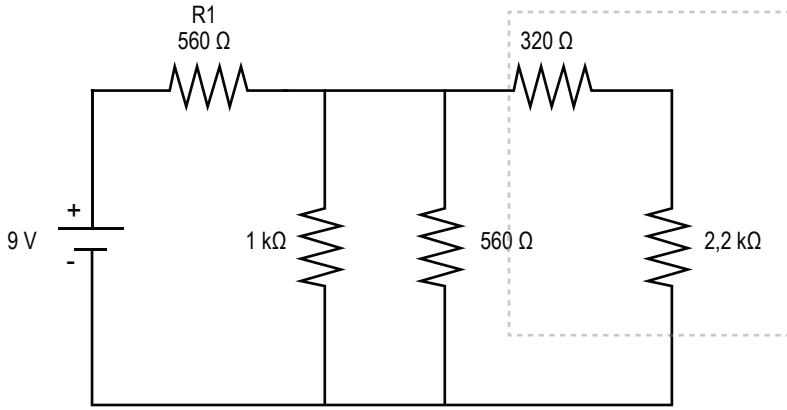
Capítulo 9

1. Qual é a potência dissipada por R1 no circuito da Figura 9.2?

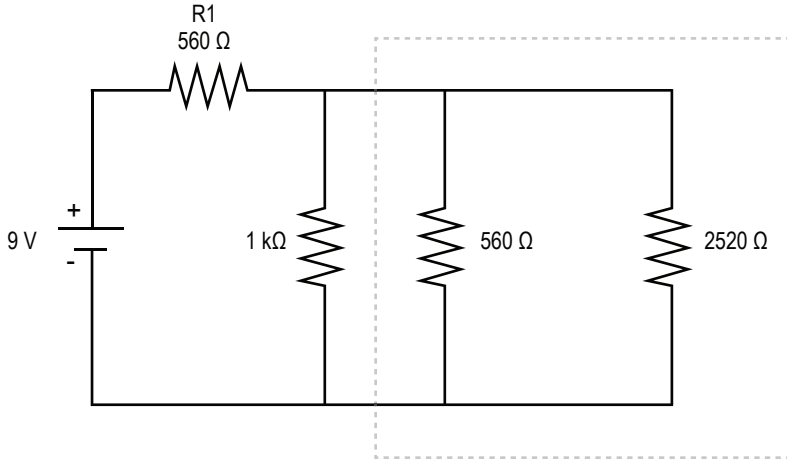


A fórmula mais prática para calcularmos a potência dissipada por R1 é $P = R \cdot I^2$ (equação 9.4). Para isso, precisamos saber a corrente que circula por R1. Estando R1 em série com o resto do circuito, esta será a corrente total do circuito (ver Primeira Lei de Kirshhoff ou Lei dos Nós). Para calcular a corrente total do circuito, temos de saber a resistência equivalente do circuito para aplicarmos a equação da Lei de Ohm. Dessa forma, trata-se basicamente de um exercício para que você calcule a resistência equivalente e aplique as fórmulas.

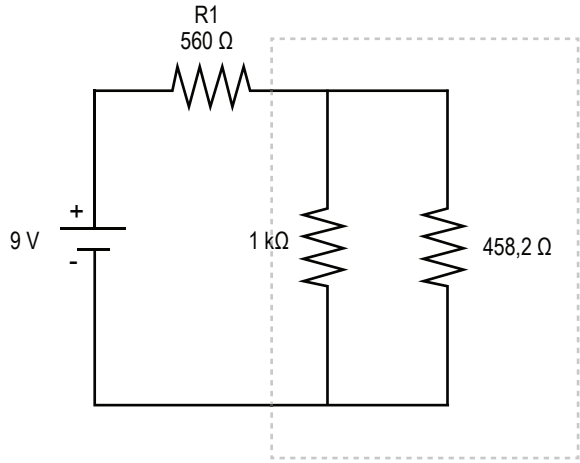
A seguir mostramos o desenvolvimento passo a passo para calcular a resistência equivalente deste circuito. Você deve começar pelos resistores mais afastados da fonte de alimentação.



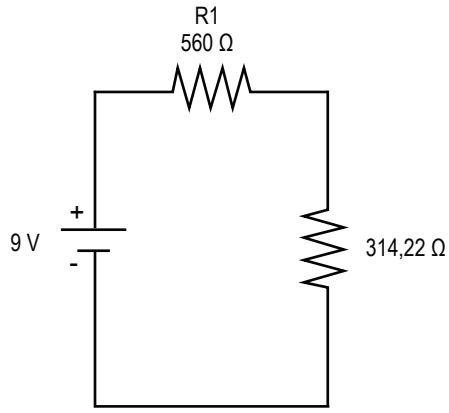
$$R_{EQ} = 320 + 2200 = 2520\,\Omega$$



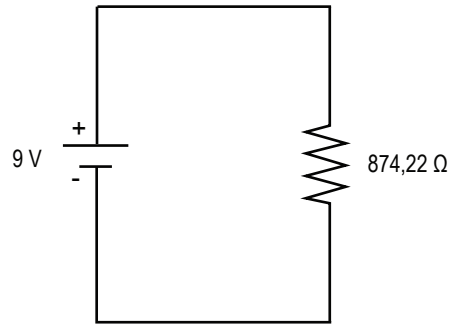
$$R_{EQ} = \frac{560 \cdot 2520}{560 + 2520} = \frac{1411200}{3080} = 458{,}2\ \Omega$$



$$R_{EQ} = \frac{1000 \cdot 458,2}{1000 + 458,2} = \frac{458200}{1458,2} = 314,22\ \Omega$$



$$R_{EQ} = 560 + 314,22 = 874,22\ \Omega$$



Dessa forma:

$$I_{R1} = I_{TOTAL} = \frac{V}{R_{EQ}} = \frac{9}{874{,}22} = 0{,}01029 = 10{,}29\ \text{mA}$$

$$P_{R1} = R1 \cdot I_{R1}{}^2 = 560 \cdot 0{,}01029^2 = 0{,}05929 = 59{,}3\ \text{mW}$$

2. Qual é a corrente elétrica consumida por uma lâmpada incandescente de 60 W em uma rede elétrica de 127 V?

$$P = V \cdot I \therefore I = \frac{P}{V} = \frac{60}{127} = 0{,}47244 = 472{,}44\,\text{mA}$$

3. Se comprarmos uma lâmpada com valores nominais "100 W – 220 V" e a ligarmos em uma rede elétrica de 110 V, qual será a potência realmente dissipada por ela, considerando que sua resistência seja constante?

A chave desta questão é "considerando que sua resistência seja constante". Neste caso, descobrimos o valor de sua resistência a 100 W e 220 V com:

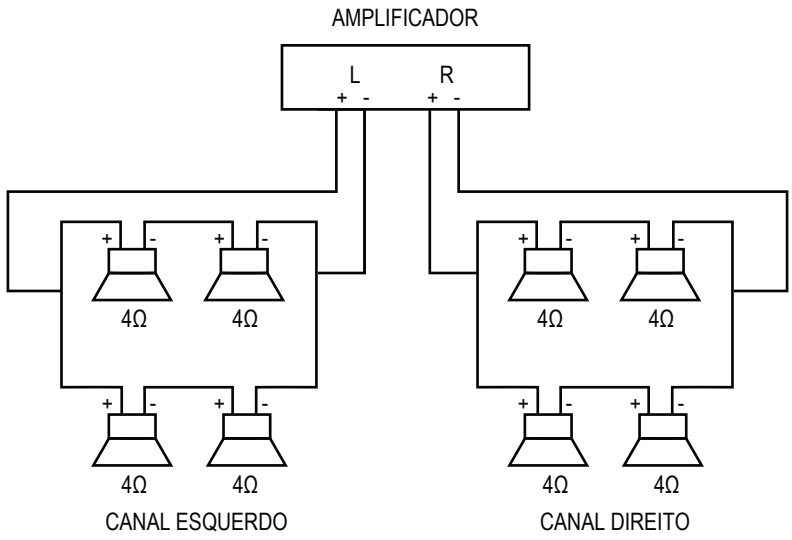
$$P = \frac{V^2}{R} \therefore R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484\ \Omega$$

Agora podemos calcular a potência dissipada por essa lâmpada em uma rede de 110 V:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{110^2}{484} = 25\,W$$

4. Temos um amplificador estéreo com impedância de 4 Ω por canal. Você vai dar uma festinha no próximo sábado à noite e juntou com a galera do seu prédio oito caixas de som de 4 Ω cada. Como essas caixas deverão ser ligadas de forma que você obtenha o máximo de potência que o seu aparelho de som é capaz de gerar?

Com oito caixas, você terá de ligar quatro no canal esquerdo e quatro no canal direito. Essa ligação deverá ser feita com duas caixas em série ligadas em paralelo com as outras duas caixas também ligadas em série, de forma que a impedância total seja de 4 Ω, por canal, como mostramos abaixo. Você deverá tomar cuidado também em relação à polaridade (ver figura).



5. Uma turbina de avião gera uma pressão sonora de 632 Pa quando estamos a 30 metros dela. Qual é o valor em decibel dessa pressão sonora?

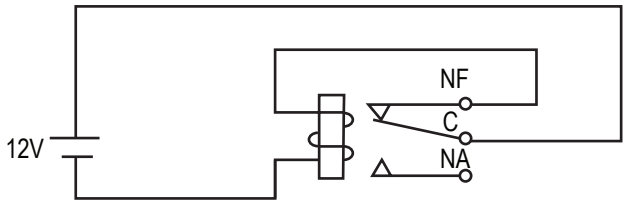
$$SPL\,(dB) = 20\,\log\left(\frac{V_1}{V_0}\right) = 20\,\log\left(\frac{632\,Pa}{20\,\mu Pa}\right) = 20\,\log\left(\frac{632}{20\cdot 10^{-6}}\right) = 149{,}99 = 150\,dB$$

6. Qual é o ganho, em decibel, de um amplificador capaz de aumentar um sinal de 0,5 Vp para 12 Vp?

$$A_V = 20\,\log\left(\frac{V_1}{V_0}\right) = 20\,\log\left(\frac{12}{0{,}5}\right) = 27{,}6\,dB$$

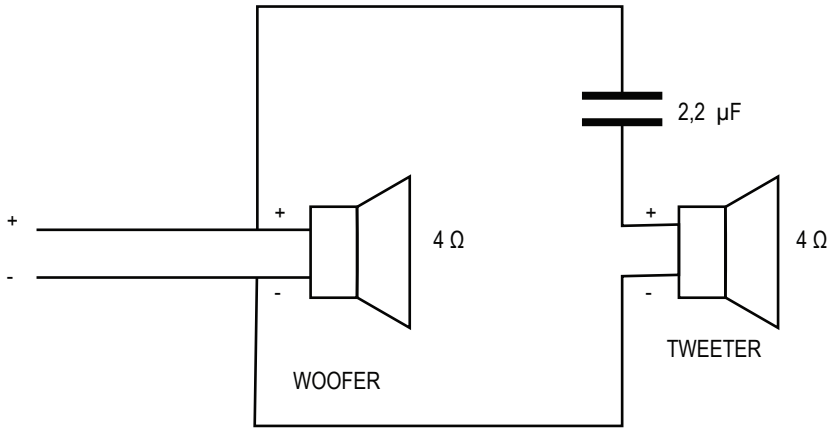
Capítulo 10

1. O que acontece se ligarmos um relé como mostrado na Figura 10.6?



Enquanto houver alimentação neste circuito, o relé ficará ligando e desligando. Assim que o circuito é alimentado, a bobina do relé é magnetizada, fazendo com que a alimentação do relé seja cortada. Com sua alimentação cortada, ele volta à sua posição de descanso, quando então sua bobina será novamente magnetizada. Esse ciclo se repetirá indefinidamente. Este circuito pode ser usado como um gerador de forma de onda quadrada rudimentar, ligando um fio ao pólo negativo da fonte de alimentação e outro ao contato NA do relé.

2. Qual é a impedância da caixa de som mostrada na Figura 10.7 a 1 kHz (equipamentos de áudio são normalmente calculados supondo uma frequência de 1 kHz)?



A solução para este exercício é dada encontrando-se a impedência equivalente do circuito. Neste caso, como a frequência é dada (1 kHz), o cálculo se procede de maneira análoga a de resistência equivalente, ou seja:

$$Z_{EQ} = Z_{WOOFER} \;//\; (X_C + Z_{TWEETER})$$

O único valor não dado é o de X_C, que pode ser facilmente calculado como vimos no Capítulo 8, usando a equação 8.2:

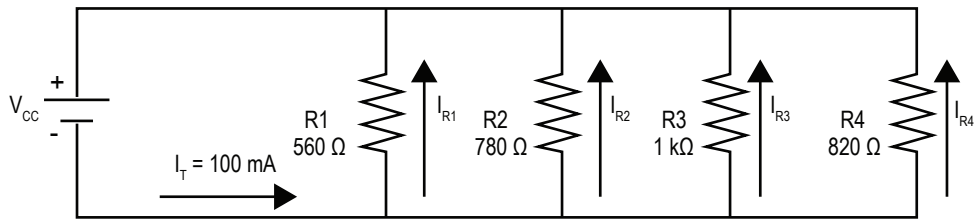
$$X_C = \frac{1}{2\pi\, fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 72,34\,\Omega$$

$$Z_{EQ} = \frac{Z_{WOOFER} \cdot (X_C + Z_{TWEETER})}{Z_{WOOFER} + (X_C + Z_{TWEETER})} = \frac{4 \cdot 76,34}{4 + 76,34} = \frac{305,36}{80,34} = 3,8\,\Omega$$

Uma discussão técnica mais detalhada sobre este exercício pode ser conferida em https://www.clubedohardware.com.br/forums/topic/1135280-d%C3%BAvida-com-exerc%C3%ADcio-do-livro-de-eletr%C3%B4nica-do-gabriel-torres/.

Capítulo 12

1. Considerando o circuito da Figura 12.1, calcule I_{R4}, sabendo-se que R1 = 560 Ω, R2 = 780 Ω, R3 = 1 kΩ e R_4 = 820 Ω. O valor da fonte não é dado e sabemos que o circuito consome 100 mA.



Para a resolução deste exercício, basta aplicar a fórmula do divisor de corrente (equação 12.2) e seguindo as explicações das páginas 116 e 117. Neste caso, ela será:

$$I_{R4} = \frac{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4} + R1} \cdot I_T$$

Assim:

$$\frac{1}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}$$

$$\frac{1}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}} = \frac{1}{560} + \frac{1}{780} + \frac{1}{1000}$$

$$\frac{1}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}} = 178{,}57 \cdot 10^{-5} + 128{,}2 \cdot 10^{-5} + 10^{-3}$$

$$\frac{1}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}} = 406{,}77 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4} = \frac{1}{406{,}77 \cdot 10^{-5}} = 245{,}84\,\Omega$$

$$I_{R4} = \frac{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4}}{\text{soma em paralelo dos resistores onde não passa } I_{R4} + R1} \cdot I_T$$

$$= \frac{245{,}84}{245{,}84 + 820} \cdot 0{,}1 = 0{,}023065 = 23{,}1 \text{ mA}$$

2. Qual é a potência dissipada por R4?

$$P = R \cdot I^2 = 820 \cdot 0{,}0231^2 = 0{,}4375602 = 437{,}6\,mW$$

3. Qual é a tensão da fonte?

Para acharmos a tensão da fonte, podemos aplicar diretamente a equação da Lei de Ohm (4.3). Para isso, precisamos primeiro saber a resistência equivalente do circuito, que é dada por R1//R2//R3//R4. Como R1//R2//R3 já foi calculado no exercício 1 (245,84 Ω), basta calcular este valor em paralelo com R4 para termos a resistência equivalente deste circuito:

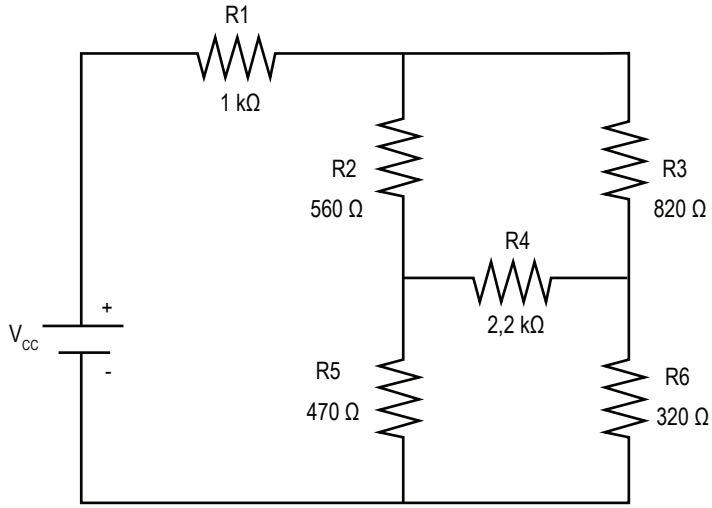
$$R_{EQ} = \frac{245{,}84 \cdot 820}{245{,}84 + 820} = 189{,}14\,\Omega$$

$$V_{CC} = I_T \cdot R_{EQ} = 0{,}1 \cdot 189{,}14 = 18{,}91\,V$$

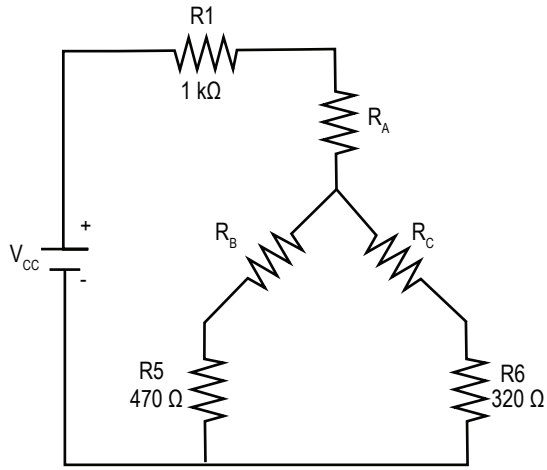
Capítulo 13

O erro mais comum dos leitores na resolução dos exercícios deste capítulo é não observar que a nomenclatura dos resistores na Figura 13.3 e nas equações 13.1, 13.2 e 13.3 são diferentes das da Figura 13.4. Você deve observar a posição dos resistores e não os seus nomes (R1, R2, R3 etc.) pois em um circuito, podemos usar qualquer nome para os resistores, que não necessariamente serão os mesmos nomes usados na Figura 13.3 e nas fórmulas.

1. Com base no circuito da esquerda Figura 13.4, considere que R1 = 1 kΩ, R2 = 560 Ω, R3 = 820 Ω, R4 = 2,2 kΩ, R5 = 470 Ω e R6 = 320 Ω. Calcule a resistência total (resistência equivalente) deste circuito.



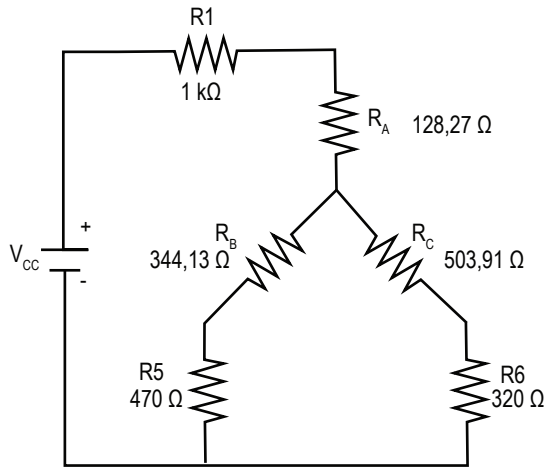
Os resistores R2, R3 e R4 formam um circuito delta, que deve ser convertido em estrela para o cálculo da resistência equivalente. O método de resolução já foi apresentado à direita da Figura 13.4, porém, como explicado, muitos leitores comentem equívocos para encontrar os valores de R_A, R_B e R_C, pois no circuito da Figura 13.4, R2, R3 e R4 são os equivalentes a R1, R2 e R3 na Figura 13.3 e nas fórmulas; você deve observar a posição dos resistores para usar as fórmulas e não seguir a nomenclatura usada, pois os nomes dos resistores usados no circuito podem ser diferentes dos nomes usados nas fórmulas, como foi o caso neste exercício. O desenvolvimento passo a passo deste exercício é o que se segue.



$$R_A = \frac{R2 \cdot R3}{R2 + R3 + R4} = \frac{560 \cdot 820}{560 + 820 + 2200} = \frac{459200}{3580} = 128{,}27\ \Omega$$

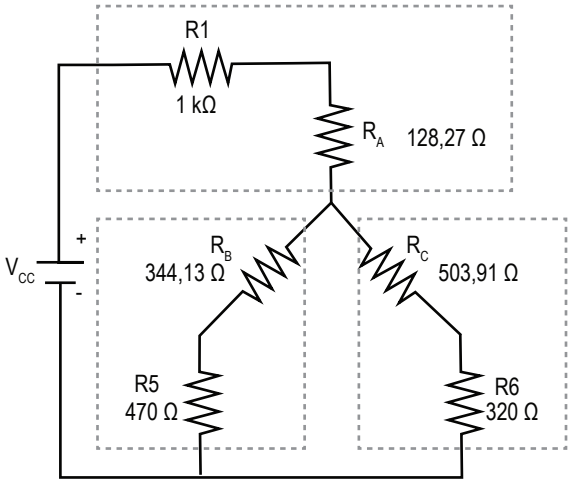
$$R_B = \frac{R2 \cdot R3}{R2 + R3 + R4} = \frac{560 \cdot 2200}{560 + 820 + 2200} = \frac{1232000}{3580} = 344{,}13\ \Omega$$

$$R_C = \frac{R3 \cdot R4}{R2 + R3 + R4} = \frac{820 \cdot 2200}{560 + 820 + 2200} = \frac{1804000}{3580} = 503{,}91\ \Omega$$



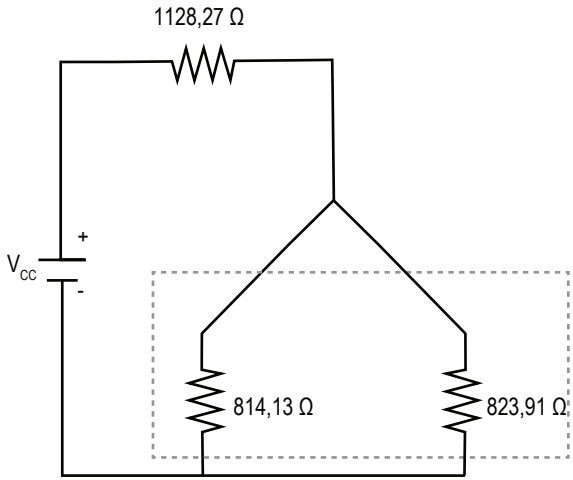
R1 e R_A estão em série e devem ser somados. R_B e R5 estão em série e devem ser somados. E R_C e R6 estão em série e devem ser somados.

1000 Ω + 128,27 Ω = 1128,27 Ω

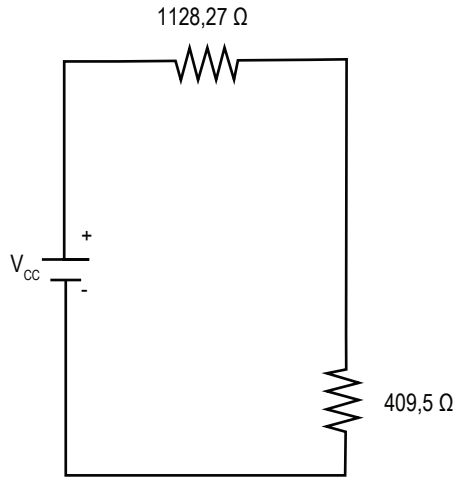


503,91 Ω + 320 Ω = 823,91 Ω

344,13 Ω + 470 Ω = 814,13 Ω



$$R_{EQ} = \frac{814,13 \cdot 823,91}{814,13 + 823,91} = \frac{670769,8483}{1638,04} = 409,5\,\Omega$$



$$R_{EQ} = 1128{,}27 + 409{,}5 = 1537{,}77 = 1538\,\Omega$$

2. Qual é a corrente consumida por R1, supondo uma fonte de alimentação de 24 V?

A corrente que circula por R1 é a corrente total do circuito, logo:

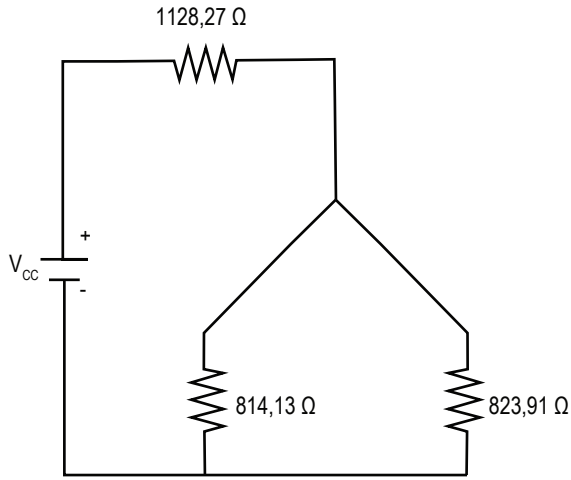
$$I_{R1} = I_{TOTAL} = \frac{V}{R_{EQ}} = \frac{24}{1538} = 0{,}0156 = 15{,}6\ \text{mA}$$

3. Qual é a potência dissipada pelo circuito, considerando uma fonte de alimentação de 24 V?

$$P = V \cdot I = 24 \cdot 0{,}0156 = 0{,}3744 = 374{,}4\,\text{mW}$$

4. Qual é o valor da corrente que circula por R5?

Muitos leitores têm dúvida sobre como calcular esta corrente. Mais especificamente, qual lógica usar. Basta observar o passo a passo para o cálculo da resistência equivalente, mais especificamente esta etapa:



A corrente que circula em R5 é a mesma que circula, neste circuito equivalente, pelo resistor equivalente de 814,13 Ω (vamos chamá-lo de $R_{EQ(R5)}$ nos cálculos abaixo), pois este resistor apresenta o valor da resistência equivalente à "perna" do circuito onde R5 está localizado.

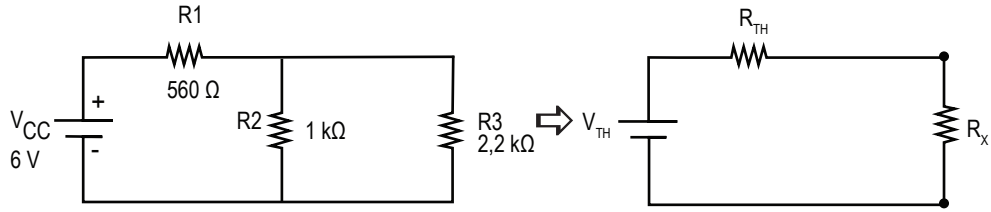
Podemos usar a fórmula do divisor de corrente (equação 12.2) para acharmos este valor:

$$I_{R5} = \frac{\text{soma dos resistores onde não passa } I_{R5} \text{ na malha}}{\text{soma dos outros resistores na malha} + R_{EQ(R5)}} \cdot I_{TOTAL}$$

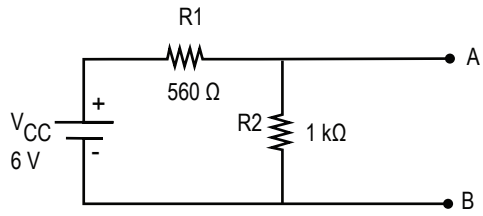
$$I_{R5} = \frac{823,91}{823,91 + 814,13} \cdot 0,0156 = 0,00785 = 7,85\,mA$$

Capítulo 14

1. Converta o circuito da Figura 14.1 em um circuito equivalente de Thévenin, considerando que R1 = 560 Ω, R2 = 1 kΩ, R3 = 2,2 kΩ e V_{CC} = 6 V, e que R_X é R3.



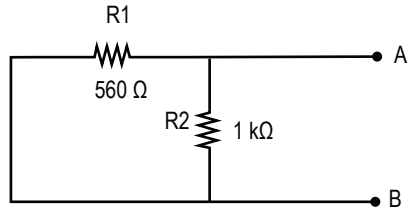
O primeiro passo é descobrir V_{TH}, que é a diferença de potencial entre os pontos com o resistor que queremos medir (no caso, R3) com ele fora do circuito, isto é, a diferença de potencial entre A e B:



Neste caso, como R2 e R3 estão em paralelo, com R3 fora do circuito, V_{TH} será igual à tensão sobre R2. Ver explicação no tópico *Calculando V_{TH}* (p. 124). Basta aplicar a fórmula do divisor de tensão (11.1). Logo:

$$V_{TH} = V_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot V_{CC} = \frac{1000}{560 + 1000} \cdot 6 = 3{,}85\ V$$

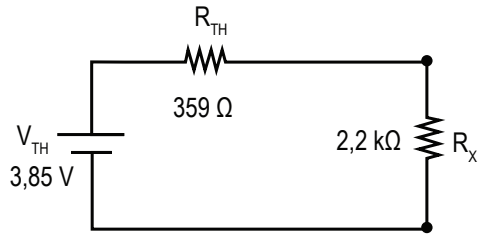
O passo seguinte é calcular R_{TH}. Para isso, removemos a fonte de alimentação do circuito e a substituímos por um fio. O resistor que estamos medindo (R3 no caso) é mantido fora do circuito com os seus pontos de conexão abertos. R_{TH} será a resistência equivalente deste circuito. Ver ilustração a seguir. Para mais informações, veja o tópico *Calculando R_{TH}* (p. 125).



$$R_{TH} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{560 \cdot 1000}{560 + 1000} = 359\ \Omega$$

2. Calcule a corrente que passa por R3.

   A primeira coisa que você precisa fazer é desenhar o circuito equivalente de Thévenin.

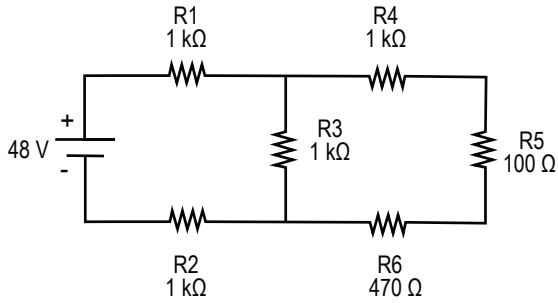


   Achar a corrente que passa sobre R3 (R_X no circuito equivalente) é muito simples, pois será a corrente total do circuito. Logo:

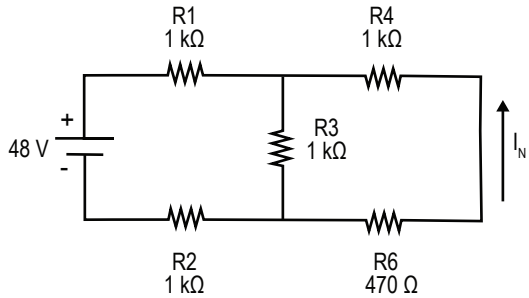
$$I_{R3} = I_{RX} = I_{TOTAL} = \frac{V_{TH}}{R_{EQ}} = \frac{3,85}{359 + 2200} = 0,0015 = 1,5 \text{ mA}$$

Capítulo 15

1. Transforme o circuito da Figura 15.5 em um circuito equivalente de Norton, onde queremos descobrir a corrente que passa em R5.



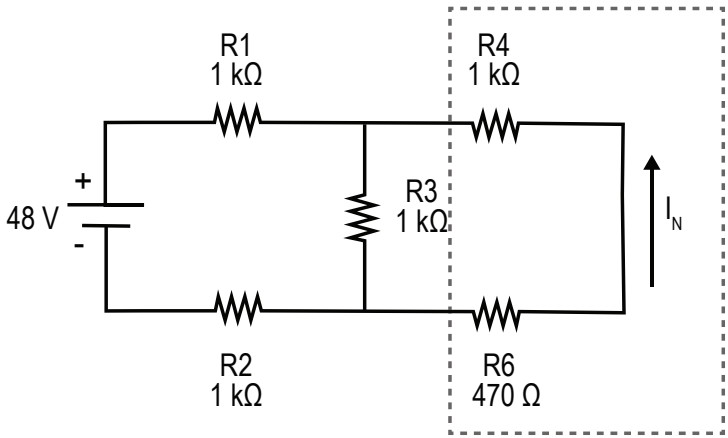
O primeiro passo é calcular o valor do gerador de corrente, I_N, que é o valor da corrente que passa pelo resistor em análise (no caso, R5) quando seus terminais estão em curto-circuito. Ilustramos isso na próxima figura.



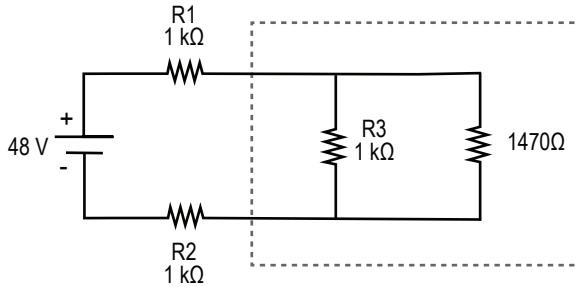
Podemos calcular o valor de I_N usando a fórmula do divisor de corrente (equação 12.2). Para isso, temos de saber a corrente total do circuito, que por sua vez para ser calculada é necessário que a gente saiba qual é a resistência equivalente do circuito:

$$R_{EQ} = \left[\left(R4 + R6\right) // R3\right] + R1 + R2$$

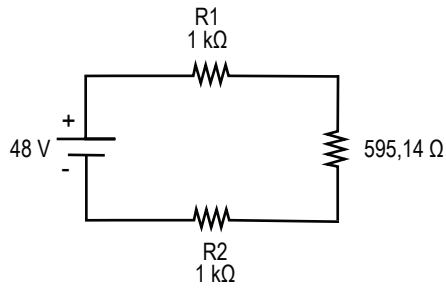
Vamos desenvolver este cálculo passo a passo.



$$R_{EQ} = 1000\,\Omega + 470\,\Omega = 1470\,\Omega$$



$$R_{EQ} = \frac{1000 \cdot 1470}{1000 + 1470} = \frac{1470000}{2470} = 595{,}14\ \Omega$$



$$R_{EQ} = 1000 + 595{,}14 + 1000 = 2595{,}14\ \Omega$$

A corrente total será, portanto:

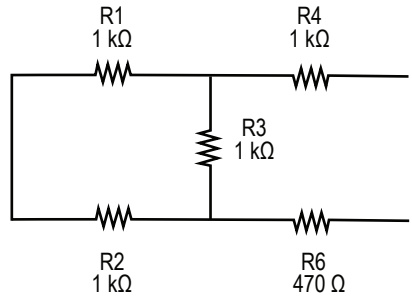
$$I_{TOTAL} = \frac{V}{R_{EQ}} = \frac{48}{2595} = 0{,}01849 = 18{,}5\ mA$$

Para calcularmos I_N, usamos a fórmula do divisor de corrente (equação 12.2):

$$I_N = \frac{\text{resistores onde não passa } I_N \text{ na malha}}{\text{soma dos outros resistores na malha}} \cdot I_{TOTAL}$$

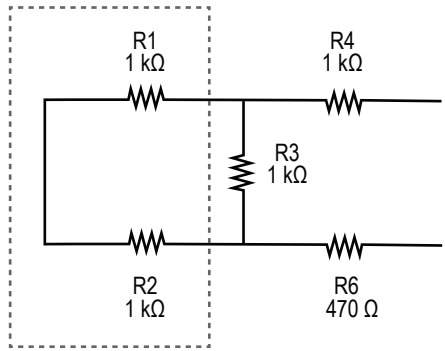
$$I_N = \frac{R3}{R3+R4+R5} \cdot I_{TOTAL} = \frac{1000}{1000+1000+470} \cdot 0{,}0185 = 0{,}0074898 = 7{,}5 \text{ mA}$$

R_{TH} deve ser calculado com o circuito aberto no ponto do resistor que queremos analisar, substituindo a fonte de alimentação por um fio. Ou seja:

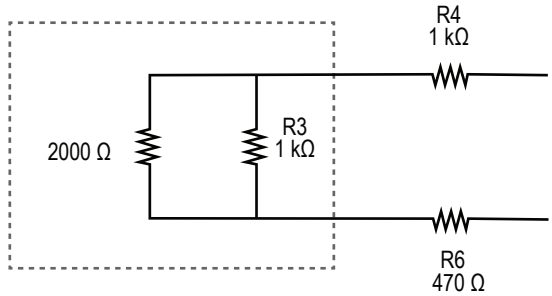


$$R_{TH} = \left[\left(R1 + R2\right) // R3\right] + R4 + R6$$

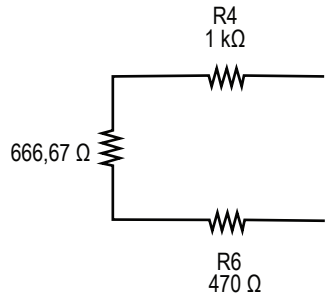
O passo a passo é o que se segue.



$$R_{EQ} = 1000\,\Omega + 470\,\Omega = 1470\ \Omega$$

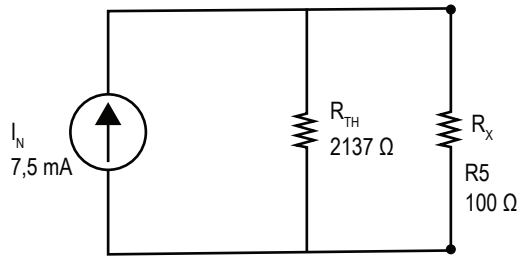


$$R_{EQ} = \frac{1000 \cdot 2000}{1000 + 2000} = \frac{2000000}{3000} = 666{,}67\ \Omega$$



$$R_{EQ} = 1000 + 666{,}67 + 470 = 2137\ \Omega$$

Logo, o circuito equivalente de Norton para o exercício proposto é o que se segue.



O cálculo da corrente que circula em R5 será:

$$I_{R5} = \frac{R_{TH}}{R_{TH} + R_X} \cdot I_N = \frac{2137}{2137 + 100} \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}007165 = 7\ 17\text{mA}$$

2. Experimente converter o circuito da Figura 15.5 em um circuito equivalente de Thévenin como explicado no capítulo passado, sem usar os valores já descobertos no exercício anterior.

Você verá como é difícil usar o Teorema de Thévenin neste circuito, pois é difícil descobrir o valor de V_{TH}. Isso mostra que há circuitos onde é mais fácil usar o Teorema de Thévenin e outros onde é mais fácil usar o Teorema de Norton. Em geral, quando R_X está em série com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Norton e quando R_X está em paralelo com outros resistores, é mais fácil usar o Teorema de Thévenin.

Capítulo 18

1. Qual é a principal característica de amperímetro ideal? Porquê?

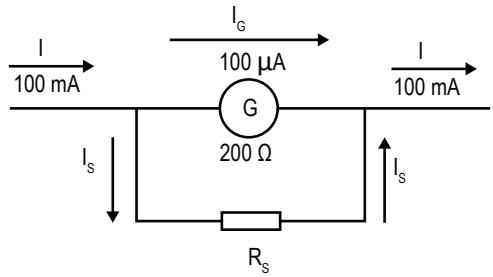
Resistência interna zero. Para que ele não interfira no circuito sendo mensurado.

2. Como um amperímetro deve ser ligado a um circuito?

Em série com o ponto onde queremos medir a corrente que está circulando.

3. Construa um amperímetro capaz de medir correntes de até 100 mA usando um galvanômetro com resistência interna de 200 Ω e corrente de fundo de escala de 100 μA.

A melhor maneira de resolver este tipo de exercício é desenhar o diagrama do que está sendo proposto. Neste caso, temos o diagrama a seguir. Basicamente, temos uma corrente máxima de 100 mA entrando no circuito, uma corrente máxima de 100 μA passando pelo galvanômetro, e queremos desviar a diferença entre essas correntes (I_S = 100 mA - 100 μA = 99,9 mA) pelo resistor de *shunt* (R_S). Precisamos, portanto, apenas calcular o valor deste resistor.



Primeiro devemos calcular a tensão que é necessária ser aplicada ao galvanômetro para que ele indique sua corrente máxima. Ou seja (usando-se a equação 4.3):

$$V_G = I_G \cdot R_G = 100\ \mu A \cdot 200\ \Omega = 20\ mV$$

Como o galvanômetro e o resistor de *shunt* estão em paralelo, a tensão sobre o resistor de *shunt* neste momento terá o mesmo valor. Assim, podemos calcular o valor deste resistor da seguinte forma (usando-se a equação 4.4):

$$R_S = \frac{V_{R_S}}{I_S} = \frac{20\,mV}{99{,}9\,mA} = 20\,m\Omega$$

Capítulo 19

1. **Qual é a principal característica de voltímetro ideal? Porquê?**

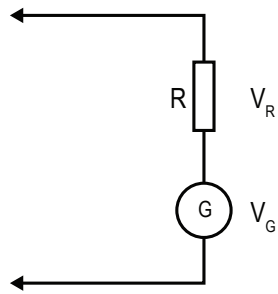
   Resistência interna infinita. Para que ele não interfira no circuito sendo mensurado.

2. **Como um voltímetro deve ser ligado a um circuito?**

   Em paralelo aos pontos onde queremos medir a tensão que está sendo aplicada.

3. **Construa um voltímetro capaz de medir tensões de até 30 V usando um galvanômetro com resistência interna de 500 Ω e corrente de fundo de escala de 1 mA.**

   A melhor maneira de resolver este tipo de exercício é desenhar o diagrama do que está sendo proposto. Neste caso, temos o diagrama a seguir.



Precisamos primeiro saber qual é a tensão máxima que aplicada ao galvanômetro, faz com que o seu ponteiro atinja o seu fundo de escala:

$$V_G = I_G \cdot R_G = 0{,}001 \cdot 500 = 0{,}5\ V$$

Logo, o que queremos é criar um divisor de tensão que, quando há 30 V sendo aplicados sobre o circuito, haja 0,5 V sobre o galvanômetro e o restante (29,5 V) seja aplicado sobre o resistor R, que pode ser calculado usando-se a fórmula do divisor de tensão (equação 11.1):

$$R = \left(\frac{V \cdot R_G}{V_G}\right) - R_G = \left(\frac{30 \cdot 500}{0{,}5}\right) - 500 = 29500\ \Omega = 29{,}5\ k\Omega$$

4. Qual é a sensibilidade do voltímetro construído na pergunta 3?

$$\text{sensibilidade} = \frac{1}{I_G} = \frac{1}{0{,}001} = 1000 = 1\ k\Omega/V$$

Ver tópico *Sensibilidade* na página 154 para mais informações.

Capítulo 20

1. Como um ohmímetro deve ser instalado para ler o valor de uma resistência desconhecida?

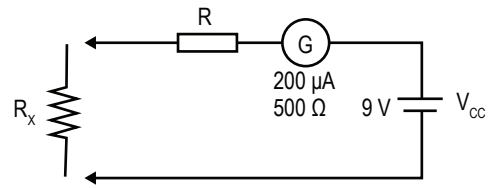
Em paralelo ao componente a ser medido, desligando-se primeiro a alimentação do circuito e removendo-se o componente a ser medido.

2. Por que ohmímetros analógicos possuem um ajuste de zero?

Para compensar a redução da tensão das pilhas, que vão ficando "gastas" com o tempo, descalibrando o instrumento.

3. Construa um ohmímetro com valor de 1 kΩ no centro da escala, usando uma bateria de 9 V e um galvanômetro com resistência interna de 500 Ω e corrente de fundo de escala de 200 μA.

A melhor maneira de resolver este tipo de exercício é desenhar o diagrama do que está sendo proposto. Neste caso, temos o diagrama a seguir.



Basta calcular o valor de R para que o galvanômetro tenha metade de sua corrente de fundo de escala quando R_X é igual a 1 kΩ (ver p. 159):

$$I = \frac{I_G}{2} = \frac{200\ \mu A}{2} = 100 \mu A$$

$$R = \left(\frac{V_{CC}}{I}\right) - R_X - R_G = \left(\frac{9}{10^{-4}}\right) - 1000 - 500 = 88500 = 88{,}5\ k\Omega$$

Capítulo 21

1. Como deve ser instalado um multímetro para medir resistência?

Ponteira preta em "COM" ou "GND", ponteira vermelha em "Ω", chave de seleção de escala em escala de resistência, efetuar ajuste de zero (somente em multímetros analógicos), ponteiras de provas instaladas em paralelo ao componente a ser medido, com o componente removido do circuito.

2. Como dever ser instalado um multímetro para medir tensão?

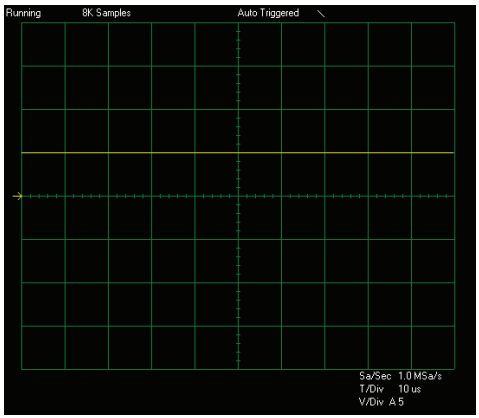
Ponteira preta em "COM" ou "GND", ponteira vermelha em "V", chave de seleção de escala em escala de tensão, ponteiras de provas instaladas em paralelo aos pontos em que você deseja medir a tensão, com o circuito ligado.

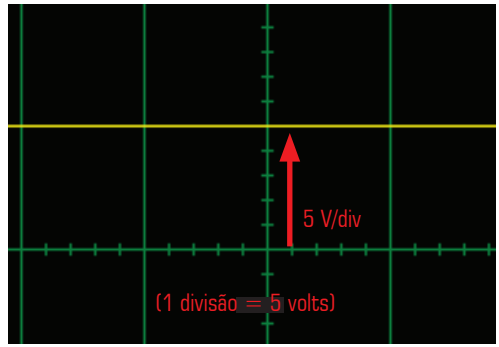
3. Como deve ser instalado um multímetro para medir corrente contínua?

Ponteira preta em "COM" ou "GND", ponteira vermelha em "mA" ou "A", chave de seleção de escala em escala de corrente, ponteiras de provas instaladas em série ao ponto em que você deseja medir a corrente. A instalação do multímetro deve ser feita com o circuito desligado, porém a medição em si deve ser feita com o circuito ligado.

Capítulo 22

1. Observe a tela do osciloscópio da Figura 22.5. Esta é uma forma de onde contínua ou alternada? Qual é o valor da tensão (a configuração do osciloscópio está descrita na parte inferior da figura)?





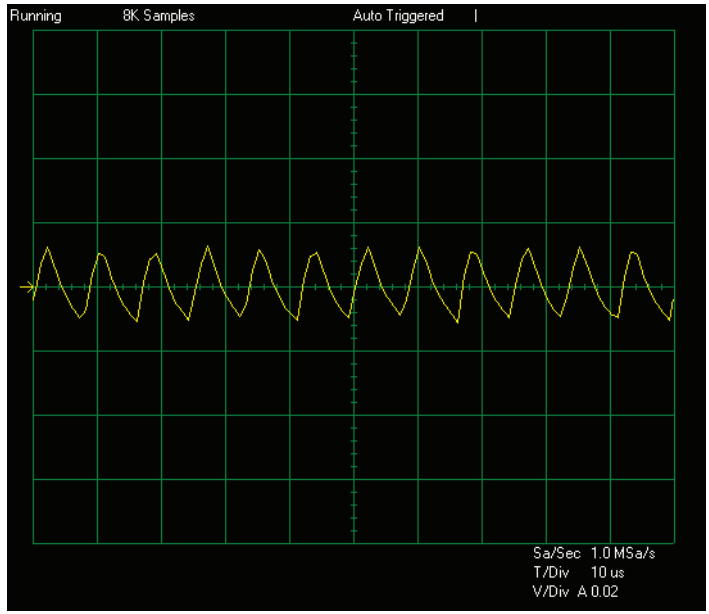
Esta é visivelmente uma tensão contínua (linha reta). O seu valor coincide com a primeira linha verde acima do eixo *x* (zero volt). Como a escala é de 5 volts por divisão (ver na parte inferior da figura a marcação "V/Div A 5", isto é, cada quadrado ou linha horizontal representa 5 V), temos uma tensão contínua de 5 V.

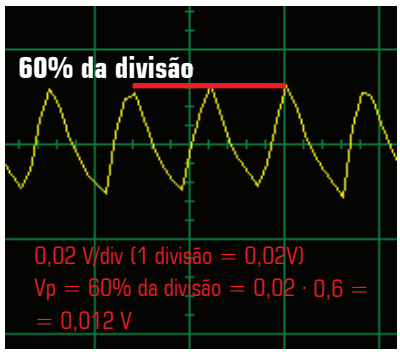
2. **Observe agora a tela da Figura 22.6. Quais são os valores (aproximados) da tensão de pico, tensão de pico-a-pico, período e frequência desta forma de onda (a configuração do osciloscópio está descrita na parte inferior da figura)?**

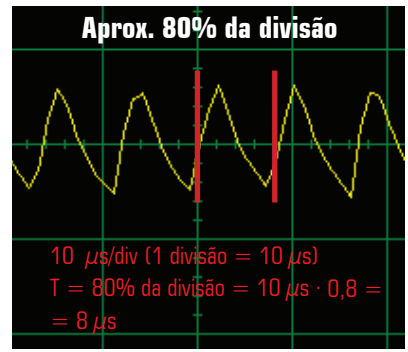
   A primeira coisa a observar é a escala do osciloscópio: 0,02 volt por divisão ("V/Div A 0.02") nas linhas horizontais e 10 μs por divisão ("T/Div 10 us") nas linhas verticais.

   O pico vai do eixo *x* (zero volt) até o ponto mais alto da forma de onda, que vai até aproximadamente o terceiro traço existente dentro da primeira divisão ("quadrado"). Como cada traço representa 20% da divisão, o ponto mais alto está em 60% da divisão. Tendo cada divisão 0,02 volt, o valor de pico será de 0,02 V · 60% = 0,012 V ou 12 mV.

   Sendo uma forma de onda simétrica, a tensão de pico a pico será o dobro da tensão de pico, ou seja, 24 mV.


Running
8K Samples
Auto Triggered
Sa/Sec 1.0 MSa/s
T/Div 10 us
V/Div A 0.02


60% da divisão
0,02 V/div (1 divisão = 0,02V)
Vp = 60% da divisão = 0,02 · 0,6 =
= 0,012 V

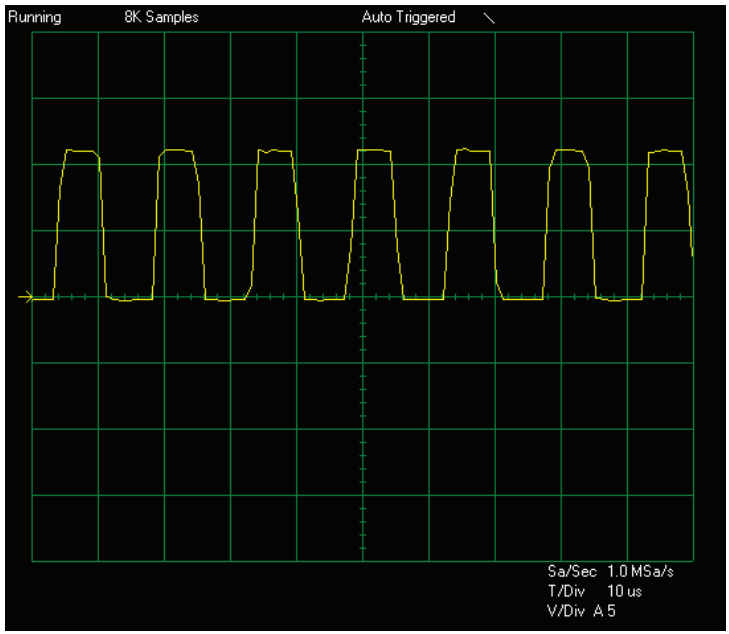

Aprox. 80% da divisão
10 μs/div (1 divisão = 10 μs)
T = 80% da divisão = 10 μs · 0,8 =
= 8 μs

Já a leitura do período é feito de forma análoga. Observando a interseção dos eixos *x* e *y*, você verá que ali tem o início de um ciclo da forma de onda, que dura até aproximadamente o último traço da primeira divisão. Este traço representa 80% do valor da divisão, que é de 10 μs. Portanto, o período é de 8 μs (10 μs · 80%).

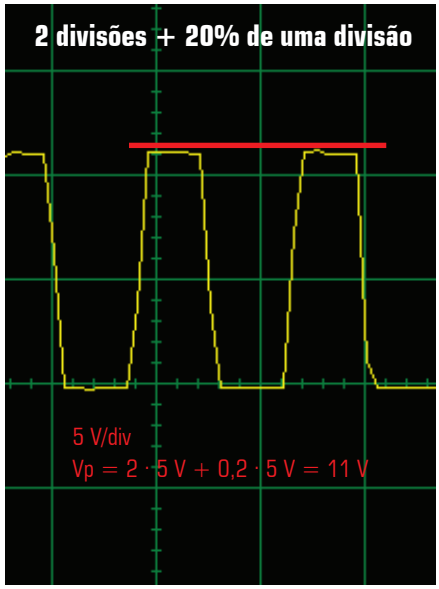
A frequência não é dada, sendo necessário calcular:

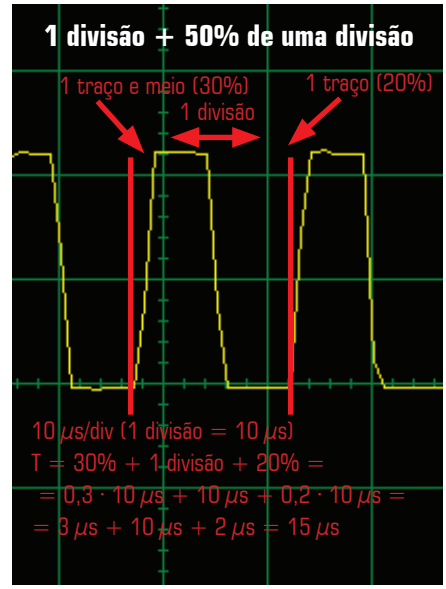
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-6}} = 125000 = 125\,kHz$$

3. Considere agora a tela da Figura 22.7. Quais são os valores (aproximados) da tensão de pico, período e frequência desta forma de onda?



$Vp = 2 \cdot 5\,V + 0{,}2 \cdot 5\,V = 11\,V$





O ponto de partida é, novamente, observar as escalas. No caso, 5 V/div e 10 μs/div.

O pico dessa forma de onda ocupa duas divisões e vai até o primeiro traço da terceira divisão, que representa 20% de uma divisão. Como a escala é de 5 V/div, temos uma tensão de pico de 11 V (5 V + 5 V + 5 V · 20%).

Já para calcular o período, você terá de tomar cuidado, pois o ciclo dessa forma de onda não está centralizado no encontro dos eixos *x* e *y*. Se você observar, um ciclo ocupa uma divisão inteira e, na parte que selecionamos na figura, um traço e meio para a esquerda e um traço para a direita. Ou seja, uma divisão mais 50% (10% do meio traço à esquerda, 20% do traço completo à esquerda e 20% do traço à direita). Com isso temos um período de 15 μs (10 μs + 50% · 10 μs).

A frequência é calculada da seguinte forma:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{15 \cdot 10^{-6}} = 66666{,}7 = 66{,}7\ kHz$$

Capítulo 23

1. Qual é o valor de um resistor com listras laranja, cinza, vermelho e dourado?

   Laranja: 3

   Cinza: 8

   Vermelho: x 10^2

   Dourado: ± 5%

   $38 \cdot 10^2 = 3800\ \Omega = 3{,}8\ k\Omega \pm 5\%$

2. **Qual é o valor de um resistor com listras marrom, preto, verde e prata?**

   Marrom: 1

   Preto: 0

   Verde: x10^5

   Prata: ± 10%

   $10 \cdot 10^5 = 10^6 = 1\ M\Omega \pm 10\%$

3. Qual é o código de cores de um resistor de 10 kΩ com 10% de tolerância?

   $10\ k\Omega = 10 \cdot 10^3\ \Omega$

   1: Marrom

   0: Preto

   x10^3: Laranja

   ± 10%: Prata

4. Qual é o código de cores de um resistor de 470 kΩ com 5% de tolerância?

   $470\ k\Omega = 470 \cdot 10^3 = 47 \cdot 10^4$

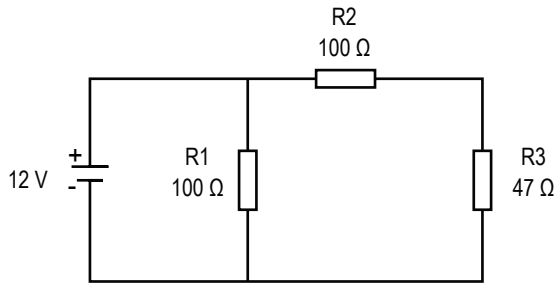
   4: Amarelo

   7: Lilás

   x10^4: Amarelo

   ± 5%: Dourado

5. **Considere o circuito da Figura 23.15. O resistor R3 é de 1/8 W. Ele funcionará corretamente ou se queimará? Porquê?**



Precisamos saber qual será a potência dissipada por R3. Para isso, precisamos saber a tensão sobre este resistor ou então a corrente que passa por ele. Existem várias formas de obter o mesmo resultado. A mais rápida é usando a fórmula do divisor de tensão (equação 11.1), pois R2 + R3 estão em paralelo com a fonte de alimentação. Assim, temos:

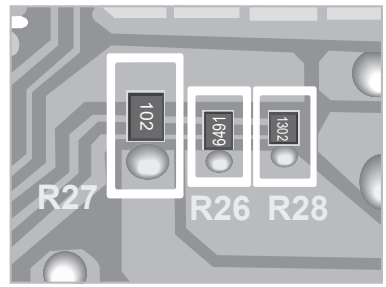
$$V_{R3} = \frac{R3 \cdot V_{CC}}{R_{EQ}} = \frac{47 \cdot 12}{100 + 47} = 3{,}84\,V$$

Sabendo-se a tensão sobre R3, calcular sua potência é fácil:

$$P_{R3} = \frac{V_{R3}^{\,2}}{R3} = \frac{3{,}84^2}{47} = 0{,}31374 = 314\,mW$$

O enunciado informa que o resistor instalado no circuito é de 1/8 W, ou seja, 0,125 W ou 125 mW. Como neste circuito R3 dissipará 314 mW mas o resistor instalado só suporta até 125 mW, este componente **queimará**.

6. Quais são os valores dos resistores da Figura 23.7?



$$R27 = "102" = 10 \cdot 10^2 = 1000\,\Omega = 1\,k\Omega$$

$$R26 = "6491" = 649 \cdot 10^1 = 6490\,\Omega = 6,49\,k\Omega$$

$$R28 = "1302" = 130 \cdot 10^2 = 13000\,\Omega = 13\,k\Omega$$

7. Qual é a potência máxima que um varistor rotulado como sendo de 5,2 J pode dissipar durante um pico de 1 ms, assumindo que ele é um componente novo e que nunca foi usado?

$$5,2\,J = 5,2\ W/s$$
$$1\,ms = 10^{-3}\,s$$

$$P = \frac{\text{energia}}{\text{duração}} = \frac{5,2}{10^{-3}} = 5200\,W = 5,2\ kW$$

Capítulo 24

1. Como um capacitor se comporta em um circuito de corrente contínua?

Bloqueia a passagem da corrente elétrica, armazenando energia e funcionando como se fosse um circuito aberto.

2. Como um capacitor se comporta em um circuito de corrente alternada?

Deixa passar corrente, mas oferecendo uma oposição à passagem da corrente elétrica chamada reatância capacitiva que varia em função da capacitância e da frequência, fazendo com que o capacitor funcione como um filtro.

3. Um capacitor de 22 pF é provavelmente de que tipo?

Cerâmico.

4. Um capacitor de 470 nF é provavelmente de que tipo?

Poliéster (embora existam capacitores cerâmicos deste valor).

5. Um capacitor de 10 μF é provavelmente de que tipo?

Eletrolítico (ou tântalo).

6. Qual é o valor equivalente de um capacitor de 220 nF x 400 V colocado em paralelo com um capacitor de 470 nF x 250 V?

690 nF x 250 V.

7. Qual é o valor equivalente de dois capacitores de 1200 μF x 200 V colocados em série?

600 μF x 400 V.

8. Qual é o valor equivalente de um capacitor de 560 nF x 250 V colocado em série com um capacitor de 330 nF x 400 V?

208 nF x 635,7 V (ou 208 nF x 500 V se o método simplificado for usado).

9. Qual é a capacitância de um capacitor cerâmico rotulado "222"?

"222" = 22 · 10^2 pF = 2200 pF = 2,2 nF

10. Qual é a capacitância de um capacitor de poliéster com as cores marrom, cinza, amarelo, branco, vermelho?

Marrom: 1

Cinza: 8

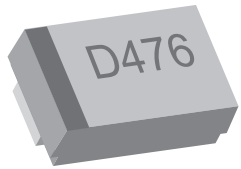
Amarelo: x 10^4

Branco: ±10%

Vermelho: 250 V

18 · 10^4 pF = 180000 pF = 180 nF ±10% x 250 V

11. Qual é o valor do capacitor da Figura 24.20?



$$"476" = 47 \cdot 10^6 \text{ pF} = 47000000 \text{ pF} = 47 \text{ µF}$$
$$"D" = 20 \text{ V}$$

Capítulo 25

1. Como uma bobina se comporta em um circuito de corrente contínua?

Com resistência próxima de zero, funcionando como se fosse um simples fio, isto é, ela deixa passar corrente.

2. Como uma bobina se comporta em um circuito de corrente alternada?

Oferece resistência à passagem da corrente elétrica, armazenando energia e funcionando como se fosse um circuito aberto.

3. No que o material usado no núcleo da bobina influencia?

Em sua capacidade de armazenar energia, por causa do ponto de saturação magnética e perda.

4. Qual é o valor de uma bobina com a marcação "1R2M"?

"1R2M" = "1R2" = 1,2 μH

"M" = ±20%

5. Qual é o valor de uma bobina axial com as cores vermelho, vermelho, marrom, prateado?

Vermelho: 2

Vermelho: 2

Marrom: x10^1

Prateado: ±10%

22 · 10 = 220 μH ±10%

Capítulo 26

1. O que acontece se você conectar o primário de um transformador de 110 V x 12 V x 250 mA a uma pilha média de 1,5 V?

Nada. Transformadores só funcionam em tensão alternada.

2. Quantas espiras deverá ter o secundário de um transformador para baixar 24 V em 3 V, supondo que o primário deverá ter 800 espiras?

Isso pode ser calculado através da relação de espiras (equação 26.1):

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Neste caso:

$$\frac{24}{3} = \frac{800}{N_S} \therefore N_S = \frac{800 \cdot 3}{24} = 100$$

3. Quantas espiras deverá ter o secundário de um transformador para aumentar de 24 V em 400 V, supondo que o primário deverá ter 120 espiras?

Aplica-se a mesma lógica do exercício anterior.

$$\frac{24}{400} = \frac{120}{N_S} \therefore N_S = \frac{400 \cdot 120}{24} = 2000$$

4. Qual será a tensão na saída de um transformador com 3000 espiras no primário e 100 espiras no secundário se aplicarmos 220 V em seu primário?

Continua-se aplicando a mesma lógica dos dois exercícios anteriores.

$$\frac{220}{V_S} = \frac{3000}{100} \therefore V_S = \frac{220 \cdot 100}{3000} = 7{,}33V$$

5. Qual será a tensão na saída de um transformador com 100 espiras no primário e 20.000 espiras no secundário se aplicarmos 12 V em seu primário?

Mesma lógica.

$$\frac{12}{V_S} = \frac{100}{20000} \therefore V_S = \frac{12 \cdot 20000}{100} = 2400V = 2{,}4kV$$

6. Qual é a tensão que obteremos na saída de um transformador 110 V x 9 V se o conectarmos invertido na tomada, isto é, se ligarmos o secundário na rede elétrica, em vez de o primário?

Basta lembrarmos que (equação 26.1):

$$\text{relação de espiras} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Logo:

$$\text{relação de espiras} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{110}{9} = 12{,}22$$

Se invertermos esse transformador como no enunciado da questão, nós invertemos a relação de espiras. Basta pensar que o número de espiras do primário passa a ser o número de espiras do secundário e vice-versa. Invertendo essa relação, temos que ela agora é de 1/12,22 ou 0,0818.

Nós temos a nova relação de espiras e o valor da tensão aplicada no primário (110 V) e queremos saber qual é a tensão que sairá no secundário. Neste caso:

$$\text{relação de espiras} = \frac{V_P}{V_S} \therefore V_S = \frac{V_P}{\text{r.e.}} = \frac{110}{0{,}0818} = 1344{,}7 = 1345\,\text{V}$$

O valor calculado pode ser ligeiramente diferente dependendo do arredondamento que você fizer para inversão da relação de espiras.

7. Calcule o número de espiras que o secundário de um transformador com múltiplas saídas (5 V, 12 V e 18 V) deverá ter, supondo 380 V no primário e um primário com 10.000 espiras.

Primeiro você deve calcular quantas espiras o secundário deveria ter para cada tensão se você estivesse construindo transformadores independentes. Neste caso, temos:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \therefore N_S = \frac{N_P \cdot V_S}{V_P} = \frac{10000 \cdot V_S}{380}$$

Para 5 V:

$$N_S = \frac{10000 \cdot 5}{380} = 131{,}58 = 132$$

Para 12 V:

$$N_S = \frac{10000 \cdot 12}{380} = 315{,}79 = 316$$

Para 18 V:

$$N_S = \frac{10000 \cdot 18}{380} = 473,68 = 474$$

Agora, como o transformador é o mesmo, parte da bobina será reaproveitada. Assim temos:

- 132 espiras até a saída de 5 V
- Da saída de 5 V, mais 184 espiras (316 - 132) até a saída de 12 V
- Da saída de 12 V, mais 158 espiras (474 - 316) até a saída de 18 V

8. Calcule o número de espiras que um transformador casador de impedância deverá ter supondo um circuito amplificador com 500 Ω de impedância em sua saída e uma caixa de som de 8 Ω. Suponha ainda que o primário tem 1.000 espiras.

Aqui devemos aplicar a equação 26.2:

$$\frac{N_P}{N_S} = \sqrt{\left(\frac{Z_P}{Z_S}\right)} \therefore \frac{1000}{N_S} = \sqrt{\left(\frac{500}{8}\right)} \therefore N_S = \frac{1000}{7,91} = 126,42 = 126$$

Capítulo 27

1. Projete um circuito estabilizador de tensão usando um diodo Zener 1N750A (V_Z = 4,7 V, I_{ZM} = 85 mA), onde a tensão de entrada varia entre 6 V e 7 V e a corrente consumida pela carga é de 25 mA.

Basta utilizar as equações 27.3, 27.4 e 27.5, lembrando que a corrente mínima de funcionamento de diodos Zener normalmente não são publicadas e devemos considerá-la como sendo 10% de sua corrente máxima. Neste exercício, portanto, podemos considerar I_{Zmin} como sendo de 8,5 mA.

$$R_{Smáx} \leq \frac{V_{imin} - V_o}{I_{Lmáx} + I_{Zmin}} \leq \frac{6 - 4,7}{0,025 + 0,0085} \leq 38,81\,\Omega$$

$$R_{Smin} \geq \frac{V_{imáx} - V_o}{I_{Zmáx} + I_{Lmin}} \geq \frac{7 - 4,7}{0,085 + 0,025} \geq 20,91\,\Omega$$

2. Projete um circuito regulador de tensão usando um diodo Zener 1N5236B (V_Z = 7,5 V, P_Z = 500 mW), onde a tensão da entrada é de 12 V e a corrente consumida pela carga varia entre 25 mA e 50 mA.

A lógica é exatamente a mesma do exercício anterior. A corrente máxima do diodo Zener não foi dada, mas é fácil calculá-la. A corrente mínima do diodo Zener será assumida como sendo 10% de sua corrente máxima.

$$P = V \cdot I \therefore I_Z = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0,5}{7,5} = 66,67 \text{ mA}$$

$$R_{Smáx} \leq \frac{V_{imin} - V_o}{I_{Lmáx} + I_{Zmin}} \leq \frac{12 - 7,5}{0,05 + 0,006667} \leq 79,41\Omega$$

$$R_{Smin} \geq \frac{V_{imáx} - V_o}{I_{Zmáx} + I_{Lmin}} \geq \frac{12 - 7,5}{0,06667 + 0,025} \geq 49,01\Omega$$

3. Qual o valor do resistor que deve ser colocado em série com um LED com corrente de teste de 10 mA a ser ligado a uma fonte de alimentação de 12 V, supondo que o LED tenha uma queda de tensão (V_F) de 3 V?

Basta aplicar a equação 27.1:

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I} = \frac{12 - 3}{0,01} = 900\Omega$$

Capítulo 28

1. Qual é a diferença entre um SCR e um TRIAC?

Quando o SCR está ligado, ele funciona como um diodo, deixando a corrente elétrica passar em apenas um sentido. Um TRIAC, quando ligado, conduz nos dois sentidos, funcionando realmente como uma chave eletrônica.

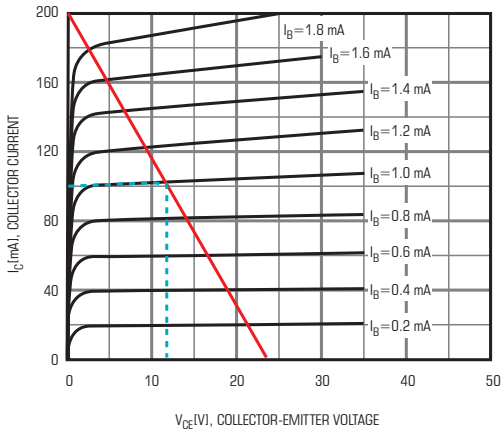
2. Qual é a diferença entre um DIAC e um TRIAC?

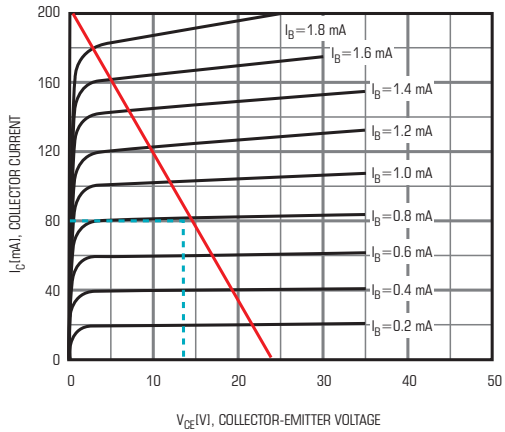
O DIAC é ativado quando a tensão entre seus terminais atinge um determinado valor. Um SCR é ativado quando aplicamos uma pequena corrente elétrica em seu gate.

Capítulo 29

1. Considere a curva característica do transistor BC635, mostrada na Figura 29.24. Trace uma reta de carga para uma corrente de coletor de 200 mA e tensão de alimentação de 24 V. Quais serão os valores de V_{CE}, I_C e I_B do ponto quiescente? Qual será o ganho de corrente?

Há várias respostas para este exercício, pois dependerá da corrente de base (I_B) que você deseja usar. Porém, preferimos selecionar um ponto na reta de carga que fique mais ou menos "no meio", para que o transistor não atinja corte nem saturação durante o seu funcionamento normal. Com isso, vimos duas respostas como "as melhores", com I_B = 1 mA e com I_B = 0,8 mA. Ver ilustrações abaixo.





Para o primeiro caso (I_B = 1 mA, ilustração da esquerda), I_C = 100 mA e $V_{CE} \approx$ 12 V. Para o segundo caso (I_B = 0,8 mA, ilustração da direita), I_C = 80 mA e $V_{CE} \approx$ 15 V. Obviamente o gráfico não apresenta uma resolução muito boa, portanto queremos apenas que você entenda a mecânica do processo.

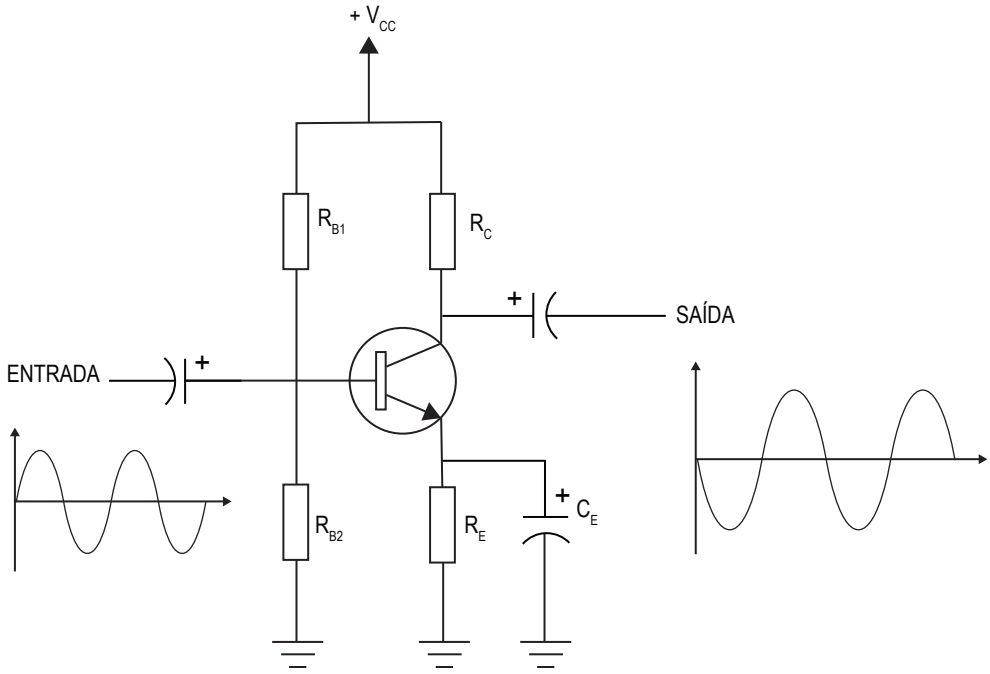
O ganho de corrente para o primeiro caso será:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{100\,mA}{1\,mA} = 100$$

Para o segundo caso:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{80\,mA}{0{,}8\,mA} = 100$$

2. Construa um amplificador classe A usando o método prático baseado no transistor 2N2222, onde queremos uma corrente de coletor de 500 mA e tensão de alimentação de 12 V. Verifique, ainda, quais são os valores comerciais mais próximos dos componentes calculados.



As fórmulas para este exercício são as equações 29.7 a 29.13. A tabela de valores comerciais é a 23.2.

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - \left(\frac{V_{CC}}{10}\right) + 0{,}7}{\left(\frac{I_C}{10}\right)} = \frac{12 - 1{,}2 + 0{,}7}{0{,}05} = 230\,\Omega \quad (\text{valor comercial: } 220\,\Omega)$$

$$R_{B2} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{10}\right) + 0,7}{\left(\frac{I_C}{10}\right)} = \frac{1,2 + 0,7}{0,05} = 38\,\Omega \text{ (valor comercial: } 39\,\Omega)$$

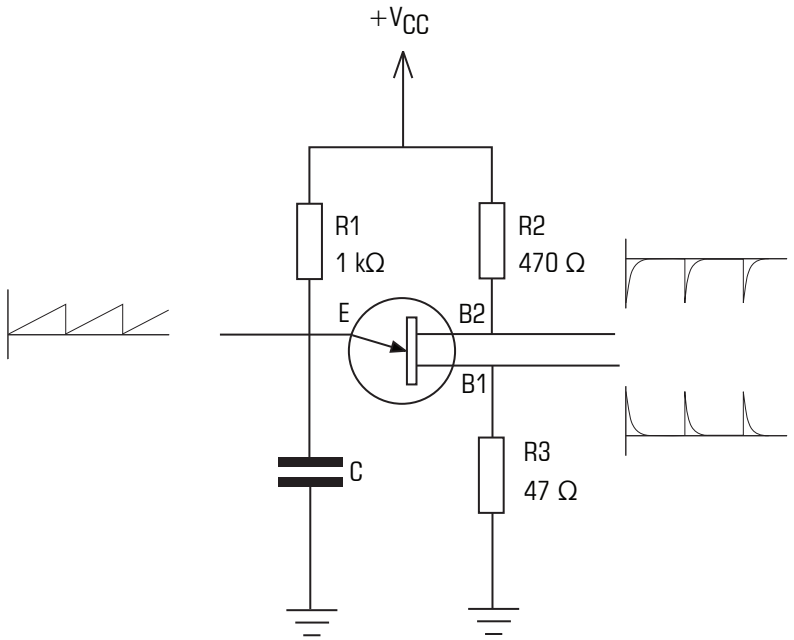
$$R_C = \frac{V_{CC} \cdot 0,4}{I_C} = \frac{12 \cdot 0,4}{0,5} = 9,6\,\Omega \text{ (valor comercial: } 10\,\Omega)$$

$$R_E = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{10}\right)}{I_C} = \frac{1,2}{0,5} = 2,4\,\Omega \text{ (valor comercial: } 2,2\,\Omega)$$

$$C_E = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot \left(\frac{R_E}{10}\right)} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 0,24} = 6,63 \cdot 10^{-4} = 663 \cdot 10^{-6}$$

$$= 663\mu F \text{ (valor comercial: } 660\,\mu F)$$

3. Projete um oscilador de relaxação baseado no transistor unijunção 2N2646 (dados: η entre 0,56 e 0,75, $I_P = 1\,\mu A$ e I_V = 6 mA) com tensão de alimentação de 6 V e frequência de oscilação de 1 kHz. Vamos arbitrar o valor de R1 como sendo de 1 kΩ.



Você deve utilizar as equações 29.19 e 29.20. O valor de R1 já é dado, portanto basta calcular o valor do capacitor.

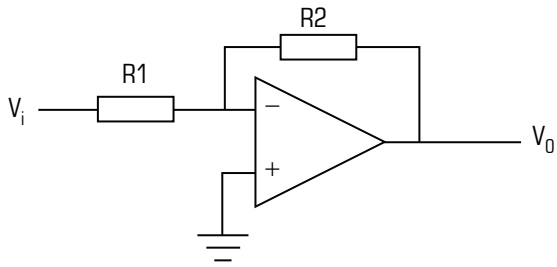
$$\eta = \frac{0,56 + 0,75}{2} = 0,655$$

$$f = \frac{1}{R1 \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)} \therefore C = \frac{1}{R1 \cdot f \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)} = \frac{1}{1000 \cdot 1000 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,345}\right)} =$$

$$= 9,4 \cdot 10^{-7} = 940 \cdot 10^{-9} = 940\,nF$$

Capítulo 30

1. Qual é o ganho do circuito da Figura 30.8 supondo que R1 = 10 kΩ e R2 = 1 MΩ?



Basta aplicar a equação 30.2.

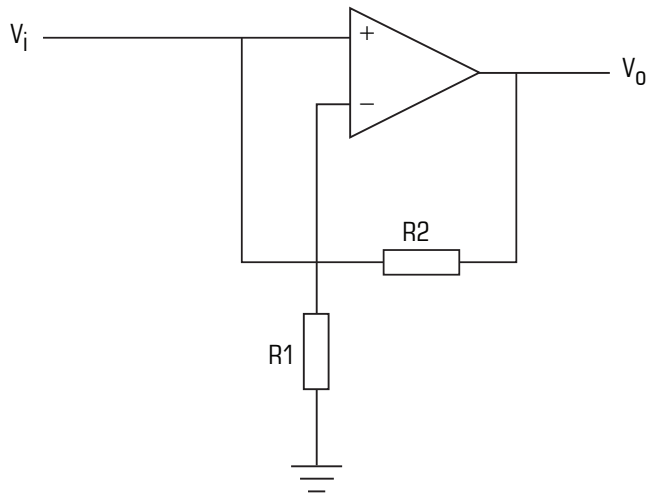
$$A_V = -\frac{R2}{R1} = -\frac{10^6}{10^4} = -10^2 = -100$$

2. Qual é a impedância de entrada do amplificador do exercício 1? Este é um valor bom ou ruim? Porquê?

Ver último parágrafo da página 336: "A impedância de entrada do amplificador inversor é dada pelo valor de R1 e, por isso, devemos usar um resistor de valor alto, pois idealmente amplificadores precisam ter alta impedância de entrada."

A impedância de entrada do circuito será de 10 kΩ, que é um valor relativamente baixo, isto é, ruim (idealmente a impedância de entrada de amplificadores deve ficar na casa de MΩ).

3. Qual é o ganho do circuito da Figura 30.7 também supondo que R1 = 10 kΩ e R2 = 1 MΩ?



Basta aplicar a equação 30.1.

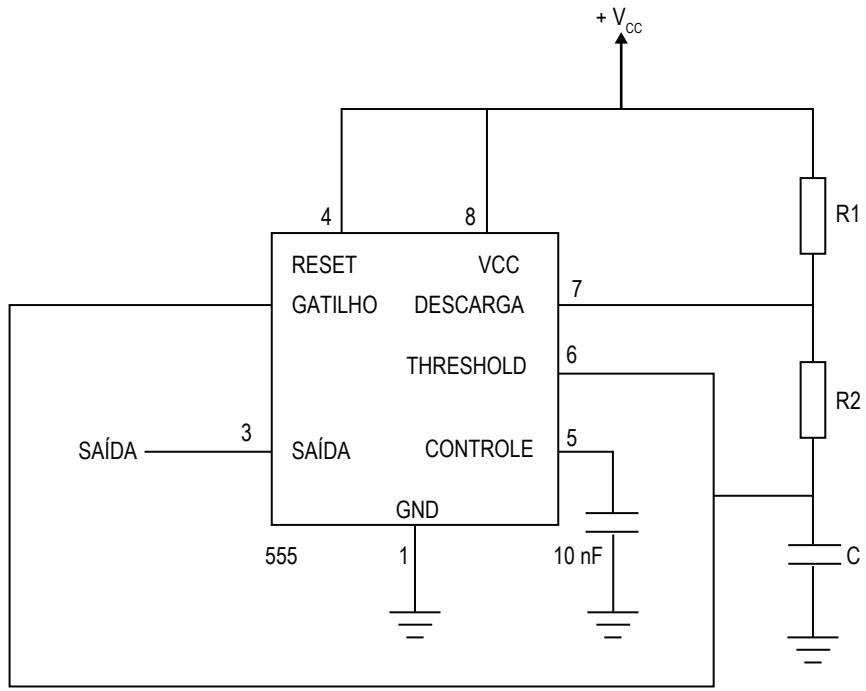
$$A_V = 1 + \frac{R2}{R1} = 1 + \frac{10^6}{10^4} = 1 + 10^2 = 101$$

4. Qual é a impedância de entrada do amplificador do exercício 3? Este é um valor bom ou ruim? Porquê?

Observando o diagrama, a impedência de entrada será dada exclusivamente pelo amplificador operacional. Conforme o texto na página 336: "O amplificador não inversor apresenta alta impedância de entrada, de pelo menos 10 MΩ. Esta configuração é a melhor escolha caso você precise de uma alta impedância de entrada." Este é um valor bom pois queremos que circuitos amplificadores tenham a maior impedância de entrada possível.

5. Desenhe um multivibrador astável com o circuito integrado 555 com frequência de 10 kHz e ciclo de carga de 85%, onde já definimos que o capacitor C será de 2,2 nF. Apresente os valores comerciais mais próximos dos resistores calculados.

Você deve utilizar as equações 30.11, 30.12 e 30.13. Como o valor do capacitor já foi definido, precisamos apenas calcular os valor de R1 e R2.



Como o ciclo de carga é de 85%, isto significa que t_1 será de 85% do período e t_0 será os 15% restantes. O período é o inverso da frequência, logo:

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^4} = 10^{-4} = 0{,}0001\,s$$

$$t_0 = 15\% \cdot t = 0{,}15 \cdot 10^{-4} = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$$

$$t_1 = 85\% \cdot t = 0{,}85 \cdot 10^{-4} = 8{,}5 \cdot 10^{-5}$$

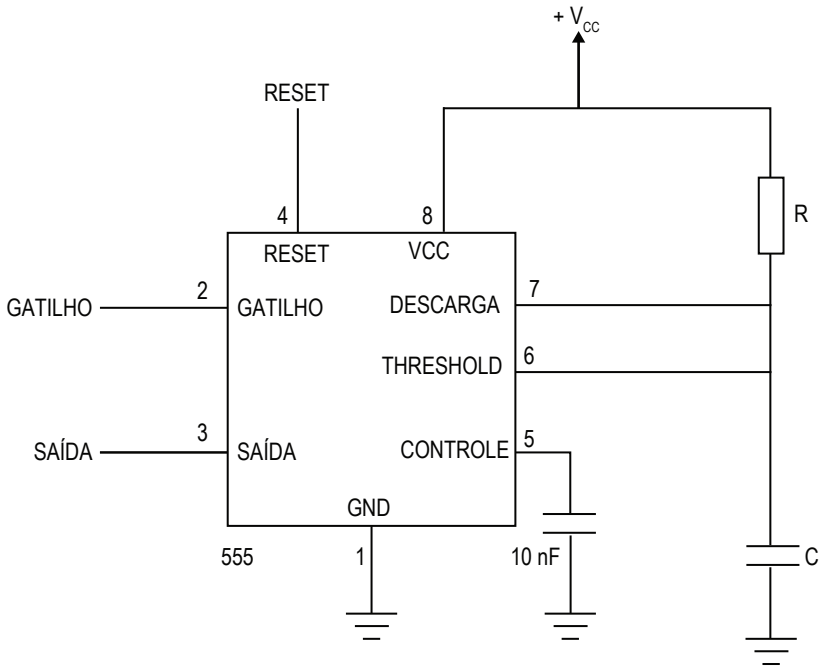
$$t_0 = 0{,}693 \cdot C \cdot R2 \therefore R2 = \frac{t_0}{0{,}693 \cdot C} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-5}}{0{,}693 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-9}} = 9839\,\Omega =$$

$$= 9{,}8\,k\Omega \text{ (valor comercial: } 10\,k\Omega)$$

$$t^1 = 0{,}693 \cdot C \cdot (R1+R2) \therefore R1+R2 = \frac{t^1}{0{,}693 \cdot C} \therefore R1 = \frac{t^1}{0{,}693 \cdot C} - R2 =$$

$$= \frac{8{,}5 \cdot 10^{-5}}{0{,}693 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-9}} - 9839 = 45913\,\Omega = 46\,k\Omega \text{ (valor comercial: } 47\,k\Omega)$$

6. Desenhe um multivibrador monoestável com o circuito integrado 555 onde o pulso de saída terá duração de 15 μs e onde já definimos que o valor do resistor será de 1 kΩ.



Basta utilizar a equação 30.14. Como o valor de R já foi dado, basta calcular o valor de C.

$$t = 1{,}1 \cdot R \cdot C \therefore C = \frac{t}{1{,}1 \cdot R} = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{1{,}1 \cdot 10^{3}} = \frac{15 \cdot 10^{-9}}{1{,}1} = 1{,}36 \cdot 10^{-8} = 13{,}6 \cdot 10^{-9} = 13{,}6\ \text{nF}$$

Capítulo 31

1. Em uma fonte de alimentação linear de 25 V, qual é a tensão mínima nominal do capacitor eletrolítico que deverá ser usado?

$$V = 25\,V \cdot \sqrt{2} = 35\ V$$

Ver explicação no tópico *Filtragem* nas páginas 359-360.

2. Se um aparelho está consumindo 150 W de uma fonte com 75% de eficiência, qual é a potência que a fonte está consumindo da rede elétrica? Quantos watts estão sendo desperdiçados?

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \therefore P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{150}{0,75} = 200\,W$$

Estão sendo desperdiçados 50 W (200 W – 150 W). Ver explicação no tópico *Introdução* nas páginas 355 e 356.

3. O que é uma fonte de alimentação síncrona?

É uma fonte chaveada onde os diodos retificadores do secundário foram substituídos por transistores MOSFET. Ver tópico *Retificação* (*Secundário*) na página 370.

4. Todos os itens abaixo ajudam a aumentar a eficiência de fontes de alimentação chaveadas, exceto:

(a) Uso de diodos Schottky

(b) Uso de transistores MOSFET

(c) Uso de capacitores sóli dos na etapa de filtragem do secundário

(d) Uso de transformador com menor área em sua curva de histerese

(e) Uso de bobina do secundário com menor área em sua curva de histerese

R. "c". Capacitores sólidos apresentarão maior vida útil e maior resistência contra problemas de vazamento e estufamento, mas não terão qualquer papel na eficiência da fonte.

5. Os nomes abaixo são configurações possíveis de fontes de alimentação chaveadas, exceto:

(a) Push-pull

(b) Chaveamento direto

(c) Meia-onda

(d) Onda completa

(e) Inversora de fase

R. "e". Nome inventado.

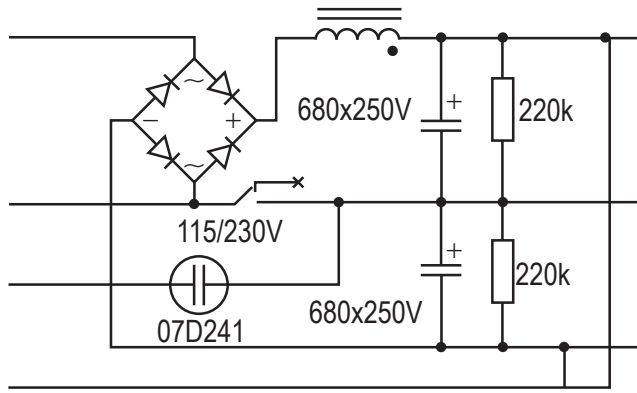
6. Fontes de alimentação chaveadas abaixadoras de tensão são baseadas em uma topologia chamada buck**.**

7. Fontes de alimentação chaveadas elevadoras de tensão podem ser baseadas em duas topologias: boost **ou** boost-buck (flyback)**.**

8. Analise o circuito da Figura 31.19 e responda:

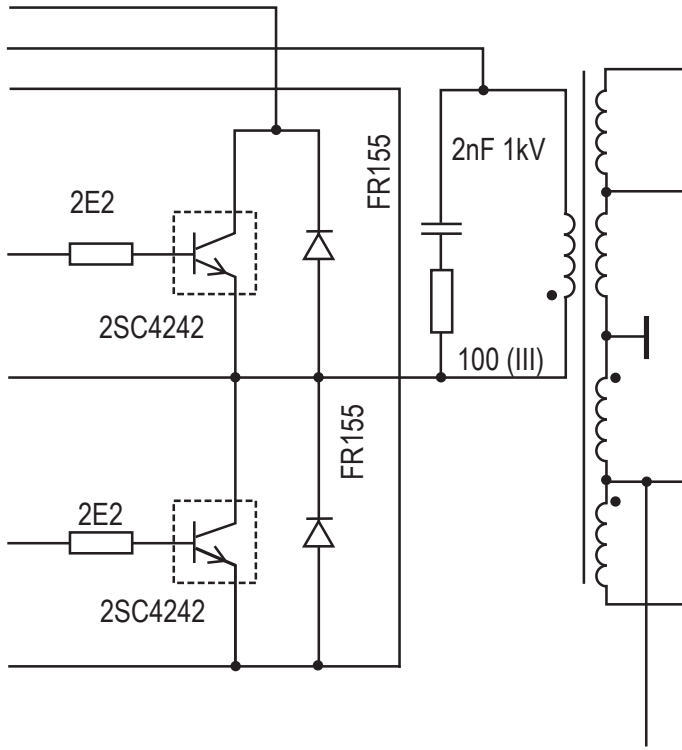
(a) Esta fonte tem circuito PFC?

Não. Basta reparar que seu primário usa um circuito dobrador de tensão.



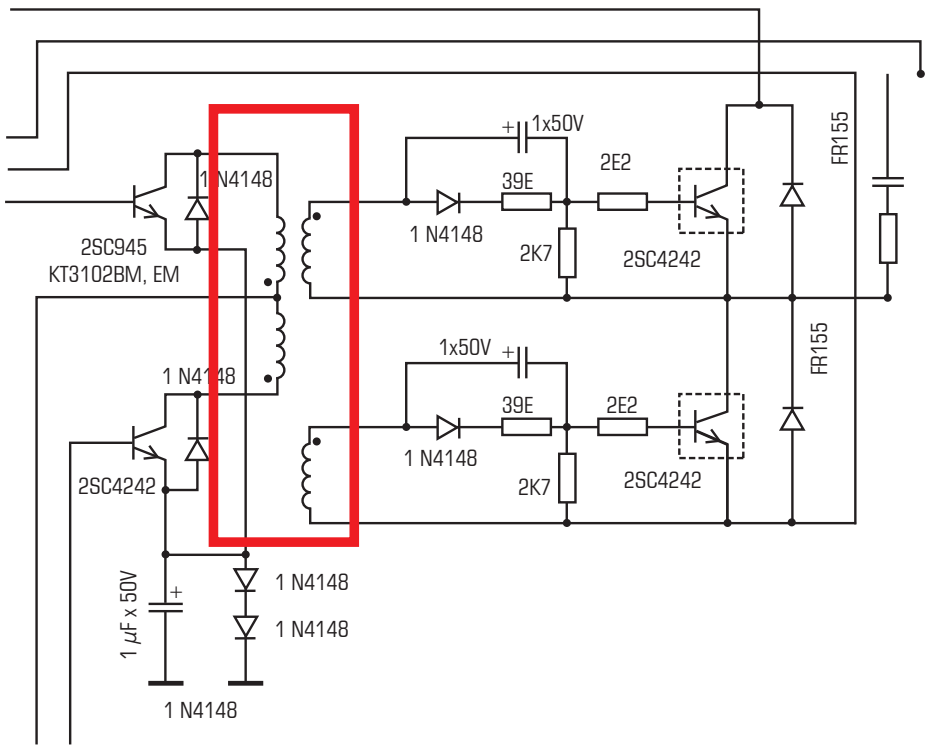
(b) Qual é a configuração usada na etapa de chaveamento?

Meia-ponte. Reparar como a configuração dos transistores chaveadores é a mesma da Figura 31.11.



(c) Que tipo de componente está fazendo o isolamento da linha de realimentação?

Transformador. Basta seguir a base dos transistores chaveadores para encontrar o componente responsável pelo isolamento (transformador).



(d) O controlador PWM está localizado no primário ou no secundário da fonte?

Secundário (já que é um transformador que está sendo usado para isolar o controle dos transistores chaveadores).

Capítulo 32

1. Em um circuito triplicador de tensão conectado à uma rede elétrica de 127 V, quais deverão ser os valores nominais mínimos dos capacitores e dos diodos?

Conforme o texto na página 381: "Interessante notar que os capacitores dos estágios adicionais serão todos carregados com o dobro da tensão de pico da entrada e, com isso, precisam ter uma tensão rotulada de pelo menos o dobro da tensão de pico da entrada. Se a tensão de

entrada for dada em valor eficaz (RMS), multiplique-o por 1,4 ($\sqrt{2}$) para saber o valor de pico equivalente. O valor dos diodos deverá ser também compatível com o dobro da tensão de pico da entrada. É importante lembrar que é sempre bom deixar uma margem de segurança na hora de escolher as tensões nominais dos capacitores."

A tensão de pico na entrada será de 179,6 V e os capacitores e diodos deverão ser de, pelo menos, 359,2 V.

2. **Quantos capacitores e diodos precisaremos para montar um circuito que multiplique uma tensão alternada por oito?**

   Para multiplicar a tensão de entrada por oito, você precisará usar o multiplicador de tensão da Figura 32.4 com quatro estágios. Como cada estágio faz uso de dois capacitores e dois diodos, você precisará usar oito capacitores e oito diodos.

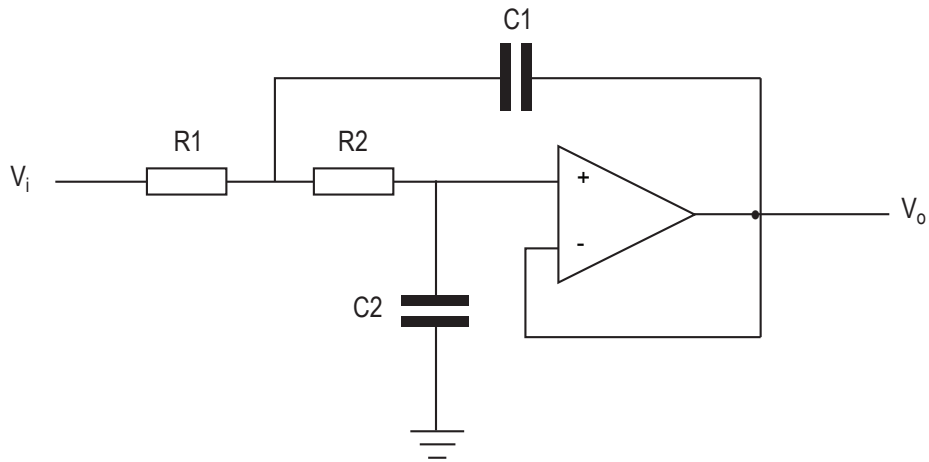
3. **Supondo que no circuito do exercício 2 a tensão de entrada é de 12 V de pico, qual é a tensão que teremos na saída?**

   Na saída teremos oito vezes o valor de pico da entrada, ou seja 96 V (12 V · 8). Porém, temos de descontar a queda de tensão de cada diodo. Como haverá oito diodos e se supormos uma queda de tensão de 0,7 V em cada um, teremos 5,6 V a menos na saída, ou seja, 90,6 V.

Capítulo 33

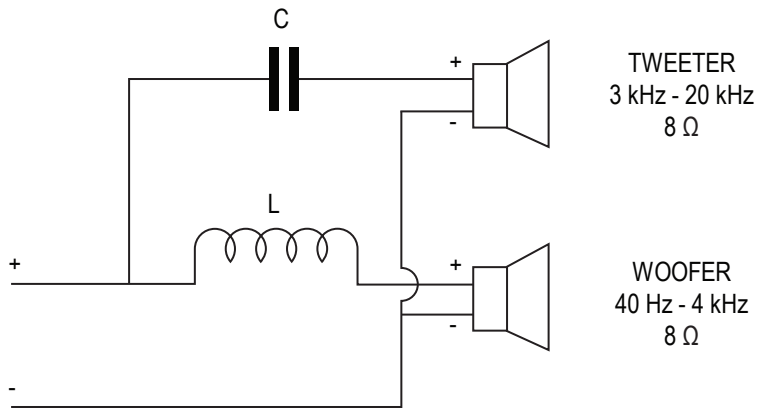
1. **Construa um filtro para eliminar frequências acima de 800 Hz usando um filtro ativo baseado em amplificador operacional, usando resistores de 47 kΩ.**

   O filtro usado deverá ser do tipo passa-baixa sintonizado a 800 Hz. Para isso, podemos usar o circuito da Figura 33.5. Você deve utilizar as equações 33.17 e 33.18, e os valores de R1 e R2 já foram dados no enunciado. A maneira mais fácil de calcular este circuito é escolher resistores e capacitores de mesmo valor.



$$f = \frac{1}{2\pi RC} \therefore C = \frac{1}{2\pi Rf} = \frac{1}{2\pi \cdot 47000 \cdot 800} = 4{,}23 \cdot 10^{-9} = 4{,}23\,nF$$

2. Considerando o projeto da caixa acústica da Figura 33.11, qual deverá ser o valor do capacitor e da bobina?



O projeto de caixas acústicas normalmente incluem o uso de filtros passivos. No caso do tweeter, que é um alto-falante para sons agudos, usamos um filtro passa-alta (no caso, sintonizado a 3 kHz), enquanto que no caso do wooder, que é um alto-falante para sons graves, usamos um filtro passa-baixa (no caso, sintonizado a 4 kHz).

Devemos utilizar a equação 33.1 para o cálculo de um filtro passa-alta passivo com apenas um capacitor em série.

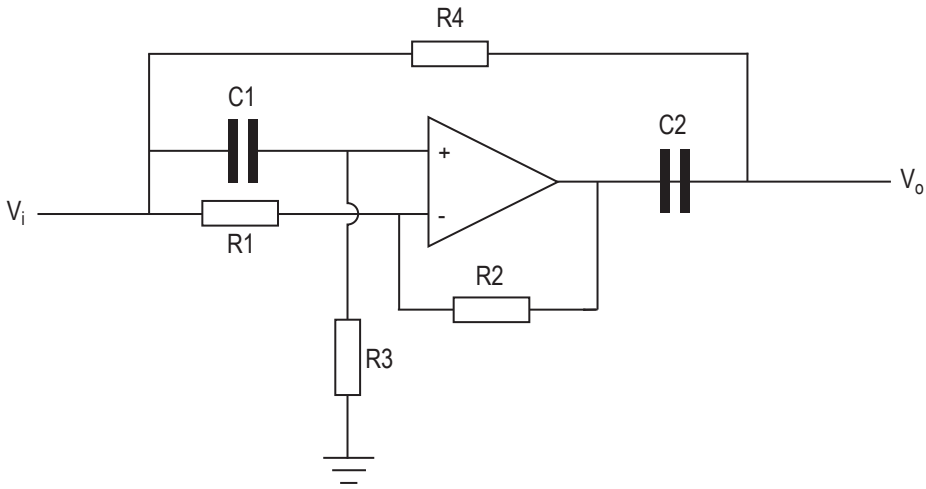
$$f = \frac{1}{2\pi Z_L C} \therefore C = \frac{1}{2\pi Z_L f} = \frac{1}{2\pi \cdot 8 \cdot 3000} = 6{,}63 \cdot 10^{-6} = 6{,}63\mu F$$

Já para o cálculo de um filtro passa-baixa passivo com apenas uma bobina em série devemos utilizar a equação 33.10.

$$f = \frac{Z_L}{2\pi L} \therefore L = \frac{Z_L}{2\pi f} = \frac{8}{2\pi \cdot 4000} = 3{,}18 \cdot 10^{-4} = 318\mu H$$

3. Construa um filtro ativo usando amplificador operacional para eliminar um ruído de 60 Hz, sendo que os valores dos resistores foram dados: R1 = 10 kΩ, R2 = 10 kΩ, R3 = 68 kΩ e R4 = 68 kΩ.

O exercício propõe um filtro rejeita-faixa sintonizado a 60 Hz. Podemos utilizar o circuito da Figura 33.9.

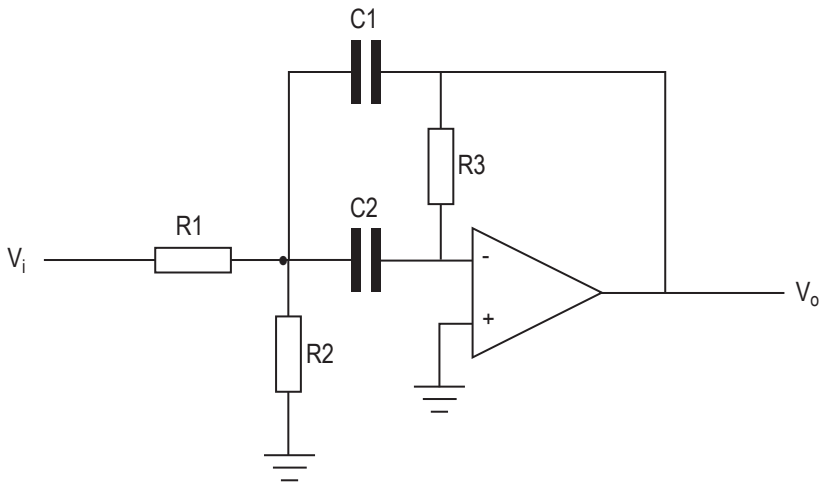


O valor dos resistores foram dados, logo precisamos calcular o valor dos capacitores, que terão o mesmo valor. Devemos utilizar as equações 33.38, 33.39 e 33.40.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \therefore C = \frac{1}{2\pi Rf} = \frac{1}{2\pi \cdot 68000 \cdot 60} = 3,9 \cdot 10^{-8} = 39\,nF$$

4. Construa um filtro ativo usando amplificador operacional para deixar passar somente a faixa de 1 kHz a 3 kHz de uma forma de onda, com um ganho de 1 e capacitores de 22 nF. Apresente os valores comerciais mais próximos dos componentes calculados.

O exercício propõe um filtro passa-faixa sintonizado entre 1 kHz e 3 kHz. Para isso, podemos usar o circuito da Figura 33.7.



Devemos utilizar as equações 33.26 a 33.30. A tabela de valores comerciais é a 23.2.

$$f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{1000 \cdot 3000} = 1732 \text{ Hz}$$

$$Q = \frac{f}{f_2 - f_1} = \frac{1732}{3000 - 1000} = 0{,}866$$

$$R1 = \frac{Q}{G\,2\pi f C} = \frac{0{,}866}{2\pi \cdot 1732 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 3617\,\Omega \ \text{(valor comercial: 3,6 k}\Omega\text{)}$$

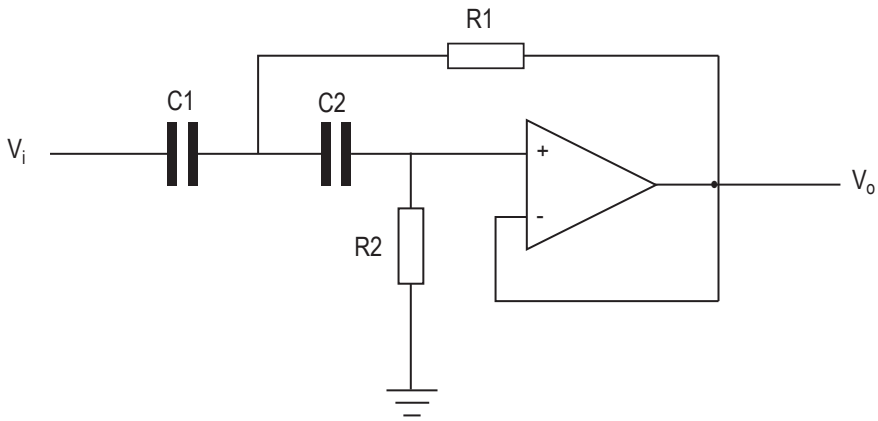
$$R2 = \frac{Q}{\left(2Q^2 - G\right)\,2\pi f C} = \frac{0{,}866}{\left(2 \cdot 0{,}866^2 - 1\right) \cdot 2\pi \cdot 1732 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 7236\,\Omega\ \text{(valor comercial: 7,5 k}\Omega\text{)}$$

$$R3 = \frac{2Q}{2\pi f C} = \frac{2 \cdot 0{,}866}{2\pi \cdot 1732 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 7234\,\Omega\ \text{(valor comercial: 7,5 k}\Omega\text{)}$$

5. Construa um filtro ativo para rejeitar frequências abaixo de 10 kHz usando resistores de 12 kΩ.

O exercício propõe um filtro passa-alta sintonizado em 10 kHz. Podemos usar o circuito da Figura 33.3.

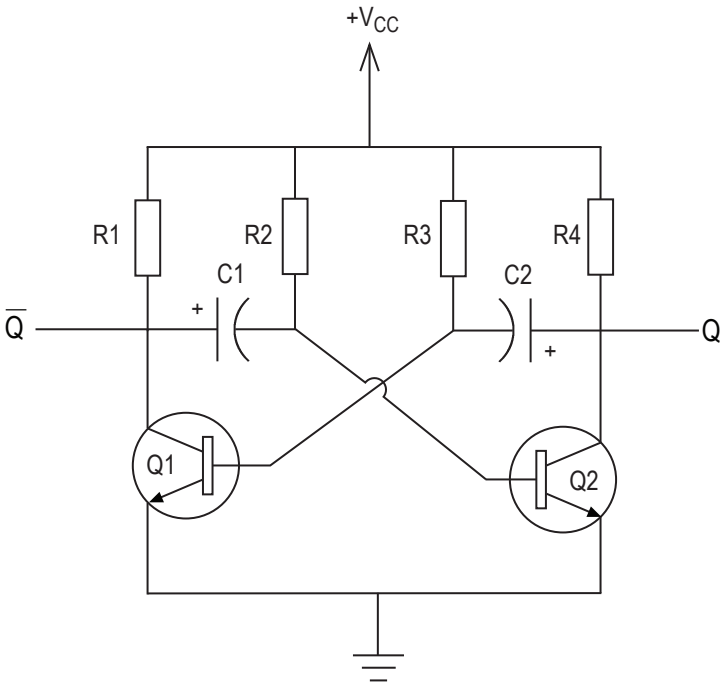


Para facilitar, usamos resistores e capacitores de mesmo valor e utilizamos a equação 33.9. Como o valor dos resistores foi dado, basta calcularmos o valor dos capacitores. Assim:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \therefore C = \frac{1}{2\pi Rf} = \frac{1}{2\pi \cdot 12000 \cdot 10000} = 1{,}33 \cdot 10^{-9} = 1{,}33\ nF$$

Capítulo 34

1. Qual é a frequencia da forma de onda de um multivibrador astável tradicional onde R1 = R4 = 270 Ω, R2 = R3 = 1 kΩ e C1 = C2 = 1 μF?



Basta utilizar as equações 34.1 e 34.2.

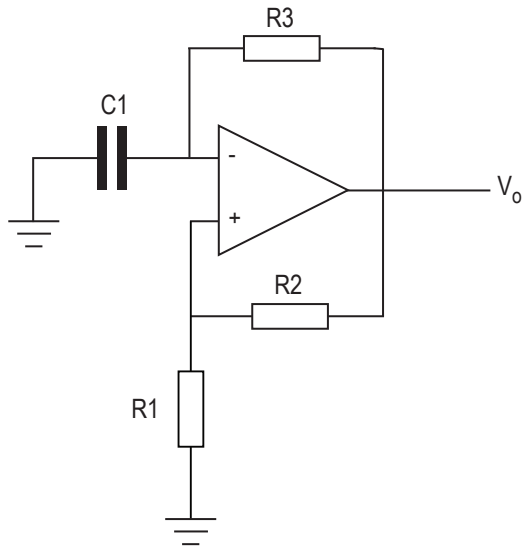
$$t_0 = 0{,}693 \cdot R2 \cdot C1 = 0{,}693 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 693 \cdot 10^{-6}$$

$$t_1 = 0{,}693 \cdot R3 \cdot C2 = 0{,}693 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 693 \cdot 10^{-6}$$

$$t = t_0 + t_1 = 693 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 1386 \cdot 10^{-6}$$

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{1386 \cdot 10^{-6}} = 721{,}5 \text{ Hz}$$

2. Construa um gerador de onda quadrada de 1 kHz usando o circuito da Figura 34.2 onde C1 = 220 nF.

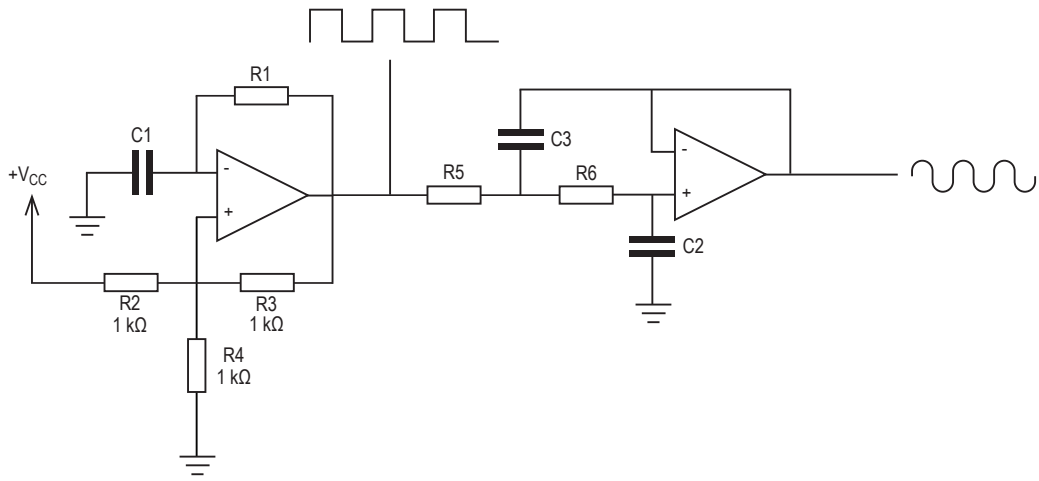


Para facilitar, assumimos o mesmo valor para R1 e R2 (este valor deverá ser arbitrado por você) e aplicamos a equação 34.5.

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3}$$

$$t = 2{,}2 \cdot R3 \cdot C1 \therefore R3 = \frac{t}{2{,}2 \cdot C1} = \frac{10^{-3}}{2{,}2 \cdot 220 \cdot 10^{-9}} = 2066\ \Omega$$

3. Construa um gerador de onda senoidal de 12 kHz usando o circuito da Figura 34.4 onde C1 = 1 nF.



Devemos utilizar as equações 34.7 a 34.11.

$$C2 = C1 = 1\,nF$$

$$C3 = 2 \cdot C1 = 2\,nF$$

$$R1 = \frac{1}{1{,}386 \cdot f \cdot C1} = \frac{1}{1{,}386 \cdot 12000 \cdot 10^{-9}} = 60125\,\Omega$$

$$R5 = \frac{1}{8{,}8856 \cdot f \cdot C1} = \frac{1}{8{,}8856 \cdot 12000 \cdot 10^{-9}} = 9378\,\Omega$$

$$R6 = R5 = 9378\,\Omega$$

Bibliografia

Apresentamos a seguir uma seleção de livros que recomendamos caso você queira se aprofundar nos assuntos apresentados neste livro.

AMERICAN RADIO RELAY LEAGUE. *The ARRL Handbook for Radio Communications 2011*. 88th ed. Newington: ARRL, 2010. 1416 p. ISBN-13 978-0872590960.

BIRD, John. *Electrical circuit theory and technology*. 4th ed. Burlington: Newnes, 2010. 742 p. ISBN-13 978-1856177702.

BOYLESTAD, Robert; NAHELSKY, Louis. *Electronic devices and circuit theory*. 10th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008. 912 p. ISBN-13 978-0135026496.

MANIKTALA, Sanjaya. *Switching power supplies a to z.* Burlington: Newnes, 2006. 528 p. ISBN-13 978-0750679701.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. *Power semiconductor applications handbook*. Hazel Grove: Philips Semiconductors, 2002. 604 p. Disponível em: <http://www.scribd.com/doc/22238961/Power-Semiconductor-Applications-Philips-Semiconductors>. Acesso em: 17 dez. 2010.

TURNER, Leslie William. *Circuitos e dispositivos eletrônicos*. Tradução: Ivan José Albuquerque. Curitiba: Hemus, 2004. 468 p. ISBN 8528900118. Tradução de: Electronics engineer's reference book 4th ed.

U.S. BUREAU OF NAVAL PERSONNEL. *Basic electricity*. Middletown: BN Publishing, 2008. 504 p. ISBN-13 978-1607960072.

U.S. BUREAU OF NAVAL PERSONNEL. *Basic electronics*. Middletown: BN Publishing, 2008. 576 p. ISBN-13 978-1607960065.

Seja aluno de Gabriel Torres e aprenda sobre redes diretamente com o autor deste livro!

CURSO ARQUITETURA DE REDES

Neste curso você aprenderá o embasamento teórico necessário para aprofundar seus estudos em cursos intermediários e avançados. Você aprenderá, entre outros assuntos, sobre princípios de funcionamento de redes, números binários, arquiteturas, comunicação, protocolos, equipamentos de redes, segurança e muito mais!

"Simplesmente incrível a quantidade de informação que o curso contém e a maneira do professor explicar. Estou gostando demais do curso e vejo que realmente valeu a pena investir nele." - *Cassius Thalles Costa Mendes*

CURSO REDES TCP/IP

Você aprenderá, entre outros assuntos, sobre endereçamento IPv4 e IPv6, portas, tradução de endereços (NAT), protocolos de aplicação (HTTP, DNS, FTP, email, etc.), protocolos de transporte (TCP e UDP), protocolos de rede (IPv4, IPv6, IPsec e ICMP), protocolos de roteamento e muito mais!

"Estou muito satisfeito com o curso! Muito bom e didático!"
Adilson Enio Pierog

Vantagens dos nossos cursos:

- Pagamento único, sem mensalidades
- Acesso vitalício
- Atualizações regulares com novas aulas e melhorias
- Acesso grátis a futuras aulas e atualizações
- Seção de perguntas e respostas para você tirar as suas dúvidas sobre o conteúdo do curso
- Certificado de conclusão de curso

https://www.clubedohardware.com.br/cursos/